



TESIS (TM 142501)

**KARAKTERISTIK *DRAG* PADA SILINDER
DENGAN *ANNULAR FIN* DENGAN VARIASI
JARAK ANTAR FIN**

SUDIRMAN
NRP. 2113 202 011

Dosen pembimbing
Prof. Ir. SUTARDI, M.Eng. Ph.D.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN REKAYASA KONVERSI ENERGI
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2015



THESIS (TM 142501)

DRAG CHARACTERISTICS OF THE ANNULAR FINNED CYLINDER WITH FIN PITCH VARIATIONS

SUDIRMAN
NRP. 2113 202 011

Advisor
Prof. Ir. SUTARDI, M.Eng. Ph.D.

MASTER PROGRAM
CONVERSION OF ENERGY ENGINEERING
MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2015

**Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T.)**

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh:


Sudirman

NRP: 2113202011

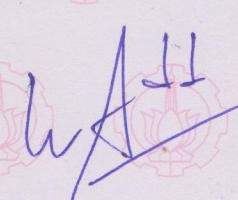
Tanggal Ujian: 23 Juni 2015

Periode Wisuda: September 2015

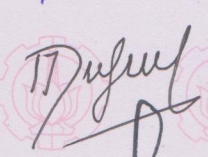
1. **Prof. Ir. Sutardi, M.Eng. Ph.D.**
NIP. 196412281990031002

 (Pembimbing)

2. **Dr. Wawan A. Widodo, ST. MT.**
NIP.197104051997021001

 (Penguji)

3. **Dedy Z. Noor, ST. MT. Ph.D.**
NIP. 197512062005011002

 (Penguji)

4. **Bambang Arip D., ST. M.Eng. Ph.D.**
NIP. 197804012002121001

 (Penguji)

Direktur Program Pascasarjana


Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T.

NIP. 196404051990021001





KARAKTERISTIK *DRAG* PADA SILINDER DENGAN *ANNULAR FIN* DENGAN VARIASI JARAK ANTAR *FIN*

Nama Mahasiswa : Sudirman
NRP : 2113202011
Pembimbing : Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D

ABSTRAK

Fluida yang mengalir melewati suatu objek akan memberikan pengaruh yang cukup signifikan berupa *lift force* dan *drag force* pada permukaan benda tersebut. Hal ini sangat dipengaruhi oleh kecepatan aliran *free-stream*, profil aliran, kondisi permukaan benda, bentuk maupun orientasi benda yang dilintasi. Salah satu bentuk benda yang banyak ditemui pada dunia industri adalah silinder dengan *annular fin*, dimana penggunaannya adalah sebagai pendingin udara *internal combustion engine* dan alat penukar kalor. Pengamatan dengan metode numerik dapat digunakan untuk menganalisa aliran di sekitar silinder dengan *annular fin* dan membandingkannya dengan hasil metode eksperimen.

Benda uji berupa silinder sirkular diameter 25 mm ditambahkan *annular fin* pada permukaannya dengan tebal fin 2 mm. Pengaruh jarak antar fin dengan variasi 10 mm, 14 mm, dan 18 mm terhadap karakteristik *drag* dan struktur aliran yang terjadi di permukaan fin dan daerah *wake* diamati dengan metode simulasi numerik menggunakan *software* Fluent 6.3 dan eksperimen pada *open-circuit sub sonic wind tunnel* dengan bilangan Reynolds $2,5 \times 10^4$ berdasarkan diameter silinder dan kecepatan rata-rata *inlet*. Pengukuran kecepatan dilakukan dengan menghubungkan *total pressure tube* ke *transducer* pada jarak $4d$ dari sumbu silinder di daerah *downstream*. Sedangkan gaya *drag* didapatkan dengan pengukuran secara langsung menggunakan *external force balance*. Model 3D-*steady flow Reynolds Averaged-Navier Stokes* (RANS) dan RNG *k-ε* dipilih sebagai *turbulence model* yang digunakan untuk simulasi numerik. Silinder bersirip yang diamati dan bentuk saluran yang digunakan merupakan bentuk benda yang simetris, maka untuk simulasi numerik digunakan *symmetry boundary*.

Total *drag* terbesar terjadi pada silinder bersirip dengan *fin pitch* 10 mm kemudian 14 mm, 18 mm, dan silinder sirkular. Hal ini dipertegas dengan profil kecepatan hasil eksperimen dan simulasi numerik yang menunjukkan bahwa daerah *wake* di belakang silinder bersirip dengan *fin pitch* 10 mm lebih luas dibandingkan silinder sirkular dan silinder bersirip lainnya. Semakin rapat jarak antar fin, separasi aliran yang terjadi pada ruang antar fin terjadi lebih awal. Letak titik separasi di permukaan silinder sirkular terjadi pada titik 119° dan pada permukaan silinder bersirip dengan jarak antar fin 10 mm, 14 mm, dan 18 mm masing-masing pada titik 112° , 113° , dan 115° . Ketika jarak antar fin meningkat, posisi separasi aliran dan vorteks di permukaan fin bergerak mendekat ke daerah di belakang silinder. Hal ini menunjukkan bahwa udara tidak mengalir dengan baik pada daerah tersebut untuk *fin pitch* yang sempit.

Kata kunci : Silinder bersirip, karakteristik *drag*, *annular fin*, *fin pitch*



“Halaman ini sengaja dikosongkan”



DRAG CHARACTERISTICS OF THE ANNULAR FINNED CYLINDER WITH FIN PITCH VARIATIONS

By : Sudirman
Student Identity Number : 2113202011
Supervisor : Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D

ABSTRACT

The fluid flows through an object will provide significant influence in the form of lift force and drag force on the surface of the object. It is highly influenced by the free-stream flow velocity, flow profile, object surface conditions, form and orientation of the object crossed. One of the objects widely used in industry is a cylinder with annular fin, where its use is as an air conditioner internal combustion engine and a heat exchanger. Observations by numerical methods can be used to analyze the flow around a cylinder with annular fins and compare it with the results of the experimental method.

The cylindrical test object with diameter of 25 mm is added annular fin on its surface with fin thickness 2 mm. The influence of fin pitch variations of 10 mm, 14 mm, and 18 mm on the characteristics of drag and flow structures that occur on the surface of the fin and wake area observed by the method of numerical simulation using FLUENT 6.3 software and experiment in open-circuit sub-sonic wind tunnel with Reynolds numbers based on the cylinder diameter and average velocity inlet is 2.5×10^4 . Velocity measurement is done by connecting the total pressure tube to transducer at a distance $4d$ of the cylinder axis in the downstream area. While the drag force is obtained by direct measurement using an external force balance. 3D models-steady flow Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) and RNG $k-\epsilon$ chosen as the turbulence model for numerical simulation. On this observations, finned cylinders and form channels that used a form of symmetrical objects, then for numerical simulation used the symmetry boundary.

The greatest drag total accoured on the finned cylinder with a fin pitch of 10 mm then 14 mm, 18 mm, and a circular cylinder. This is confirmed by experimental and numerical simulations results of velocity profiles indicate that the wake region behind the cylinder fins with fin pitch of 10 mm wider than the circular cylinder and other finned cylinder. When the fin pitch increased, flow separation that occurs in the space between the fin occurs earlier. The location of the separation point on the surface of a circular cylinder occurs at the point on the surface 119° and the finned cylinder with fin pitch of 10 mm, 14 mm, and 18 mm respectively at the point of 112° , 113° , and 115° . When the fin pitch increased, the position of flow separation and vortex at the surface of the fin moved to the leeward side. The result shows that the air does not flow well to the leeward side.

Keywords: finned cylinder, drag characteristics, annular fins, fin pitch



“Halaman ini sengaja dikosongkan”



KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis curahkan kepada Allah *Subhanahu Wata'ala, Rabb* yang senantiasa mencurahkan rahmat-Nya kepada seluruh makhluk-Nya, atas taufiq dan izin-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini. Penyusunan tesis ini dapat diselesaikan tidak lepas dari dukungan dan bantuan berbagai pihak, maka melalui kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Ir. Sutardi, M.Eng. Ph.D, selaku dosen pembimbing tesis yang telah memberikan banyak arahan, saran, motivasi, dan ilmu yang mendukung penyusunan tesis ini.
2. Bapak Ir. Bambang Pramujati, MSc. Eng. PhD selaku Kepala Jurusan Teknik Mesin ITS.
3. Bapak Dr. Wawan Aries Widodo, ST. MT dan Bapak Dedy Zulhidayat Noor, ST. MT. Ph.D, selaku dosen penguji tesis.
4. Bapak Bambang Arip Dwiyantoro, ST. M.Eng. Ph.D selaku dosen penguji tesis dan dosen wali yang telah memberikan bimbingan dan arahan selama proses pendidikan di Jurusan Teknik Mesin ITS.
5. Bapak dan Ibu dosen staf pengajar Jurusan Teknik Mesin ITS, khususnya staf pengajar bidang RKE yang telah memberikan motivasi dan ilmu yang sangat bermanfaat dalam mendukung penyusunan tesis ini.
6. Bapak dan Ibu karyawan Jurusan Teknik Mesin ITS yang telah membantu kelancaran proses perkuliahan dan penyusunan tesis ini.
7. Bapak Nur Rochman dan Bapak Sutrisno selaku pembimbing di Lab. Mekanika Fluida, atas bimbingan dan saran-saran selama dalam pembuatan benda uji dan pengambilan data eksperimen.
8. Kedua orang tua tercinta yang menjadi sumber inspirasi dan selalu memberikan motivasi, dukungan, dan do'a hingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini.
9. Rekan-rekan mahasiswa Teknik Mesin ITS, khususnya mahasiswa magister RKE 2013, atas dukungan dan kebersamaan dalam berbagi ilmu selama menempuh pendidikan magister.
10. Rekan-rekan Lab. Mekanika Fluida yang banyak memberikan bantuan dan dukungan.
11. Seluruh civitas akademik Teknik Mesin ITS.
12. Resky Rauf, istri tercinta yang telah mendampingi, memberikan motivasi, dan dukungan moril selama pendidikan dan penyusunan tesis.
13. Rekan-rekan Forbis (Forum Belajar Islam) dan Wahdah Islamiyah Surabaya, atas kebersamaan dalam menuntut ilmu agama dan semangat dalam *amar ma'ruf nahi munkar*.
14. Semua pihak yang tidak sempat disebutkan oleh penulis dalam tulisan ini.



Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan tesis ini tidak luput dari kekurangan, oleh karena itu saran dan masukan yang membangun dari semua pihak sangat penulis harapkan. Akhirnya, penulis berharap tesis ini dapat memberikan manfaat dan kontribusi bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Surabaya, Juni 2015

Penulis



DAFTAR ISI

	Halaman
JUDUL PENELITIAN	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR SIMBOL	xix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 <i>Boundary Layer</i>	5
2.2 Karakteristik Aliran di Sekitar Silinder	6
2.3 <i>Drag</i>	12
2.4 Intensitas Turbulensi (<i>IT</i>)	19
2.5 Pengaturan Besaran Turbulen pada Fluent	20
BAB 3 METODA PENELITIAN	23
3.1 Model dan Variasi Penelitian	23
3.2 Simulasi Numerik dengan Fluent 6.3	24
3.2.1 Model Benda Uji	25
3.2.2 Domain Simulasi dan Kondisi Batas	27
3.2.3 <i>Meshing</i>	28
3.2.4 <i>Grid Independensi</i>	29
3.2.5 <i>Processing</i>	31
3.2.6 <i>Post Processing</i>	33
3.3 Eksperimen dengan Terowongan Angin	35
3.3.1 <i>Open Circuit Sub Sonic Wind Tunnel</i>	35
3.3.2 Setup Alat dan Benda Uji	37
3.3.3 Parameter Penelitian	40
3.3.4 Prosedur Pengambilan Data	41
3.4 Tempat dan Waktu Penelitian	44



BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	45
4.1 Profil Kecepatan di Daerah <i>Wake</i>	46
4.1.1 Profil Kecepatan Hasil Eksperimen	46
4.1.2 Profil Kecepatan Hasil Simulasi Numerik	48
4.1.3 Perbandingan Profil Kecepatan Hasil Eksperimen dan Simulasi Numerik.....	50
4.2 Intensitas Turbulensi (<i>IT</i>) Hasil Simulasi Numerik.....	51
4.3 Koefisien Tekanan (C_p) Hasil Simulasi Numerik	54
4.3.1 Distribusi Koefisien Tekanan (C_p) di Permukaan Silinder..	54
4.3.2 Distribusi Koefisien Tekanan (C_p) di Permukaan Fin	56
4.4 Koefisien <i>Drag</i> (C_D)	59
4.5 Visualisasi Numerik.....	61
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	75
5.1 Kesimpulan	75
5.2 Saran	76
DAFTAR PUSTAKA.....	76
LAMPIRAN	79
BIOGRAFI PENULIS	95



DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 3. 1 Dimensi Objek dan Variasi Penelitian	23
Tabel 3.2 Hubungan Kualitas <i>Mesh</i> dan Nilai <i>Skewness</i>	28
Tabel 3.3 <i>Grid independensi</i> silinder sirkular tanpa fin.....	29
Tabel 3.4 Jadwal Kegiatan Penelitian	44
Tabel 4.1 Perbandingan C_P di permukaan silinder hasil simulasi numerik sudut 0° (titik stagnasi)	59
Tabel 4.2 Perbandingan koefisien <i>drag</i> hasil eksperimen dan simulasi numerik.....	60



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**DAFTAR GAMBAR**

	Halaman
Gambar 2.1 Visualisasi aliran pada permukaan silinder dengan silinder terpotong pada upstream, $Re = 5,3 \times 10^4$	5
Gambar 2.2 Profil <i>nondimensional</i> aliran <i>boundary layer</i> (Fox dkk, 2010)	6
Gambar 2.3 Medan kecepatan aliran rata-rata di belakang silinder dengan bilangan Reynolds berbeda.....	7
Gambar 2.4 Arus pada sirip dan fragmen di depan silinder bersirip dengan $Re = 2,6 \times 10^4$	9
Gambar 2.5 Pola aliran di depan silinder bersirip	9
Gambar 2.6 Titik pengambilan data dan grafik pengaruh kecepatan udara dan <i>fin pitch</i> terhadap koefisien perpindahan panas pada titik 33 mm dari <i>root fin</i>	11
Gambar 2.7 Pola aliran pada fin	12
Gambar 2.8 Aliran <i>inviscid</i> di sekitar silinder sirkular	13
Gambar 2.9 Lokasi separasi aliran <i>boundary layer</i> dan distribusi tekanan permukaan untuk aliran <i>inviscid</i> dan aliran <i>boundary layer</i>	15
Gambar 2.10 Koefisien <i>drag</i> sebagai fungsi bilangan Reynolds untuk silinder bundar dan bola licin dan pola aliran dari aliran yang melewati sebuah silinder bundar pada berbagai bilangan <i>Re</i> ...	17
Gambar 2.11 Gaya tekan dan gaya geser pada elemen kecil dari permukaan benda.....	18
Gambar 2.12 Deskripsi rata-rata terhadap waktu dan fluktuasi dari sebuah parameter aliran turbulen.....	19
Gambar 3.1 Model objek penelitian	24
Gambar 3.2 Model simetris 3D pada simulasi numerik silinder bersirip.....	26
Gambar 3.3 Model objek penelitian simulasi numerik	26
Gambar 3.4 Domain simulasi numerik.....	27
Gambar 3.5 Tipe <i>boundary</i> pada gambit untuk simulasi numerik.....	27
Gambar 3.6 Hasil <i>meshing</i> silinder bersirip $s = 14$ mm	30
Gambar 3.7 Diagram alir proses pemodelan dengan Fluent 6.3	34



Gambar 3.8	<i>Open circuit sub sonic wind tunnel</i>	35
Gambar 3.9	Skema alat penelitian <i>sub sonic wind tunnel</i>	36
Gambar 3.10	Inverter FVR-G5, alat pengatur frekuensi putaran motor penggerak.....	37
Gambar 3.11	<i>Total Pressure Tube</i>	37
Gambar 3.12	<i>Test section</i> dan benda uji pada <i>wind tunnel</i>	38
Gambar 3.13	OM-DAQPRO-5300 alat pembaca sinyal yang dihasilkan <i>transducer</i> dan <i>Differential pressure transmitter</i>	39
Gambar 3.14	<i>Inclined</i> manometer.....	40
Gambar 3.15	Diagram alir proses eksperimen dengan <i>sub sonic wind tunnel</i>	42
Gambar 4.1	Profil kecepatan pada daerah <i>wake</i> hasil eksperimen	47
Gambar 4.2	Volume atur aliran melintasi silinder sirkular.....	47
Gambar 4.3	Profil kecepatan pada daerah <i>wake</i> hasil simulasi numerik.....	49
Gambar 4.4	Profil kecepatan silinder bersirip $s = 10$ mm pada daerah <i>wake</i> hasil eksperimen dan simulasi numerik	50
Gambar 4.5	Intensitas turbulensi (<i>IT</i>) pada daerah <i>wake</i> hasil simulasi numerik	52
Gambar 4.6	Intensitas turbulensi (<i>IT</i>) pada daerah <i>wake</i> hasil simulasi numerik, silinder sirkular dan silinder bersirip dengan <i>fin pitch</i> 10 mm	53
Gambar 4.7	Distribusi koefisien tekanan di permukaan silinder sirkular dan silinder bersirip pada $Re\ 2,5 \times 10^4$ di daerah <i>midspan</i>	55
Gambar 4.8	Perbandingan profil kecepatan hasil simulasi numerik pada posisi 90° untuk silinder sirkular dan silinder bersirip.....	56
Gambar 4.9	Posisi pengambilan data koefisien tekanan di permukaan fin ..	57
Gambar 4.10	Perbandingan distribusi koefisien tekanan di permukaan fin pada <i>fin pitch</i> 10 mm dan 18 mm yang berdekatan dengan <i>midspan</i> sebagai fungsi koordinat radial nondimensional	57
Gambar 4.11	Koefisien <i>drag</i> silinder sirkular dan silinder bersirip hasil eksperimen dan simulasi numerik.....	60
Gambar 4.12	<i>Pathline</i> dan vektor kecepatan (m/s) aliran di depan silinder bersirip dengan <i>fin pitch</i> 10 mm dan 18 mm pada daerah <i>midspan</i>	61



Gambar 4.13	Kontur kecepatan dan vektor kecepatan (m/s) di permukaan fin dengan <i>fin pitch</i> 10 mm pada daerah di dekat <i>midspan</i>	62
Gambar 4.14	<i>Contour</i> dan vektor kecepatan (m/s)	63
Gambar 4.15	<i>Pathline</i> kecepatan aliran fluida (m/s) pada daerah <i>midspan</i> silinder sirkular (tanpa fin)	64
Gambar 4.16	<i>Pathline</i> kecepatan aliran fluida (m/s) melalui silinder sirkular 3D	65
Gambar 4.17	<i>Pathline</i> dan kontur kecepatan aliran fluida (m/s) pada daerah <i>midspan</i> silinder sirkular dan silinder bersirip	66
Gambar 4.18	<i>Pathline</i> aliran 3D dan kontur kecepatan aliran fluida (m/s) pada daerah 20 mm dari ujung silinder yang sejajar <i>midspan</i> ..	67
Gambar 4.19	<i>Pathline</i> dan kontur kecepatan aliran fluida (m/s) pada daerah <i>midspan</i> silinder sirkular	68
Gambar 4.20	<i>Pathline</i> dan kontur kecepatan aliran fluida (m/s) pada daerah <i>midspan</i> silinder bersirip dengan <i>fin pitch</i> 10 mm	69
Gambar 4.21	<i>Pathline</i> dan kontur kecepatan (m/s) di permukaan fin untuk masing-masing variasi jarak antar fin.....	70
Gambar 4.22	Kontur tekanan statis (Pa) pada bidang <i>midspan</i> silinder sirkular dan silinder bersirip	71
Gambar 4.23	Kontur intensitas turbulensi (%) pada bidang <i>midspan</i> silinder sirkular dan silinder bersirip	73
Gambar 4.24	Kontur intensitas turbulensi (%) pada bidang potongan simetris <i>centerline</i> silinder untuk silinder sirkular dan silinder bersirip	74



“Halaman ini sengaja dikosongkan”





BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Interaksi antara aliran fluida dan benda berbentuk *bluff body* (benda tumpul) maupun *streamlined body* (benda berbentuk ramping) yang diam maupun bergerak banyak ditemui dalam aplikasi teknik. Alat penukar kalor, konstruksi bangunan lepas pantai, jembatan, dan alat-alat transportasi adalah diantara dari sekian banyak bidang yang perancangannya dipengaruhi oleh sifat aliran fluida. Hal ini menjadikan karakteristik aliran fluida melalui sebuah benda menjadi topik penelitian yang banyak dilakukan. Ishima dkk (2008), Pis'mennyi (2012), dan Widodo dkk (2009) telah meneliti perubahan aliran dari *up-stream* hingga *down-stream* setelah melewati benda uji dengan beberapa variasi.

Fluida yang mengalir melewati objek akan memberikan pengaruh yang cukup signifikan berupa gaya angkat dan gaya *drag* pada permukaannya. Besar gaya-gaya ini tergantung pada kecepatan aliran *free-stream*, profil aliran, kondisi permukaan benda, bentuk maupun orientasi benda yang dilintasi. Pada *bluff body*, gaya *drag* didominasi oleh *pressure drag* sedangkan pada *streamlined body*, umumnya didominasi oleh *skin friction drag* (Widodo dkk, 2009). Efek viskositas memberikan kontribusi terhadap gesekan sehingga fluida pada *boundary layer* kehilangan energi selama mengalir. Hal ini dapat menimbulkan separasi aliran di permukaan benda jika dikombinasikan dengan kenaikan tekanan. Semakin cepat separasi aliran terbentuk, maka luas daerah *wake* semakin besar. Triyogi dkk (2009) telah melakukan pengujian penundaan separasi aliran benda berbentuk silinder sirkular dengan memasang silinder tipe I pada *upstream*. Khashehchi dkk (2014) membandingkan *wake* yang terjadi di belakang silinder bersirip dan *foamed cylinder*.

Perancangan peralatan secara benar memungkinkan untuk meningkatkan efisiensi penggunaan energi dan biaya produksi. Yoshida dkk (2006) melakukan studi eksperimen untuk mengamati pengaruh kecepatan udara, jumlah dan jarak antar fin (*fin pitch*) pada mesin sepeda motor dengan pendinginan udara terhadap



koefisien perpindahan panas di permukaan fin. Temperatur yang tinggi pada permukaan fin akan menjadikan deformasi yang lebih besar pada silinder dan peningkatan penggunaan minyak pelumas. Hal yang sama juga ditunjukkan oleh Sorathiya dkk (2014) yang telah melakukan studi literatur tentang efek dari beberapa parameter fin terhadap laju perpindahan panas pada *internal combustion engine*. Huang dan Chung (2014) dalam percobaannya telah menyimpulkan bahwa bentuk fin yang optimal dapat menghasilkan efisiensi maksimum.

Beberapa contoh studi di atas menggunakan objek penelitian silinder sirkular dengan fin berbentuk gelang (*annular fins*) yang penggunaannya banyak ditemui sebagai pendinginan udara *internal engine combustion* maupun alat penukar kalor. Laju perpindahan panas akan meningkat dengan meningkatnya jumlah fin pada silinder, namun pada aliran udara rendah, pendinginan silinder akan berkurang dengan penyempitan jarak antar fin akibat penambahan jumlah fin. Hal tersebut disebabkan udara tidak mengalir dengan baik pada ruang antar fin (Yoshida dkk, 2006). Penambahan objek pada domain aliran fluida akan memberikan kontribusi terhadap *pressure drop* aliran (Pis'mennyi dkk, 2014), sehingga hal tersebut menjadi hal yang harus dipertimbangkan dalam perancangan teknik. Berdasarkan hal tersebut, pengetahuan tentang karakteristik aliran fluida melalui silinder bersirip menjadi cukup penting untuk diamati.

Beberapa penelitian tentang aliran di sekitar silinder bersirip yang telah disebutkan sebelumnya adalah pengamatan dengan metode eksperimen. Fokus pembahasan yang dilakukan yaitu, pengaruh penggunaan fin pada silinder (dengan beberapa variasi yang telah ditentukan) terhadap peningkatan koefisien perpindahan panas, sehingga didapatkan konfigurasi *fin pitch* yang sesuai untuk kondisi-kondisi tertentu (Yoshida dkk, 2006).

Hasil beberapa penelitian tersebut dapat menjadi data pembanding untuk mengamati hubungan penggunaan fin pada silinder sirkular terhadap pola aliran yang dihasilkan, karakteristik *drag* dan distribusi tekanan di permukaan silinder. Selain pengamatan eksperimen, metode numerik menjadi alternatif lain yang dapat digunakan untuk menganalisa aliran di sekitar silinder bersirip dan membandingkannya dengan metode eksperimen.



1.2 Perumusan Masalah

Perumusan masalah pada penelitian ini berdasarkan uraian yang telah disebutkan pada latar belakang sebelumnya, yaitu:

1. Bagaimana karakteristik *drag* pada silinder bersirip dengan *fin pitch* yang berbeda?
2. Bagaimana pengaruh *fin pitch* terhadap separasi aliran di permukaan silinder dan permukaan fin?
3. Bagaimana pengaruh *fin pitch* pada silinder terhadap koefisien tekanan (C_p) di permukaan silinder dan fin?
4. Bagaimana fenomena aliran yang melintasi silinder sirkular dan silinder bersirip di daerah wake?

1.3 Batasan Masalah

Penelitian ini dilakukan dengan membandingkan metode eksperimen dan metode numerik untuk mengamati karakteristik aliran melewati silinder bersirip. Pembahasan yang akan diamati berada pada batasan masalah berikut.

1. Silinder bersirip yang diamati pada kondisi isothermal, sehingga temperatur permukaan silinder dianggap sama dengan temperatur udara di sekitarnya.
2. Pengamatan yang dilakukan yaitu pada keadaan aliran tunak (*steady state*), *incompressible*, *viscous*, *freestream* dan *uniform* di sisi masuk *test section*.
3. Pengaruh variasi *fin pitch* terhadap karakteristik aliran yang diamati pada silinder tunggal bersirip.
4. Kekasaran permukaan pada benda uji diabaikan.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan yang akan dicapai pada penelitian ini adalah untuk:

1. Mengetahui pengaruh variasi perubahan *fin pitch* terhadap karakteristik *drag* pada silinder bersirip.
2. Mengetahui pengaruh *fin pitch* terhadap separasi aliran di permukaan silinder dan permukaan fin berdasar atas data dari simulasi numerik.



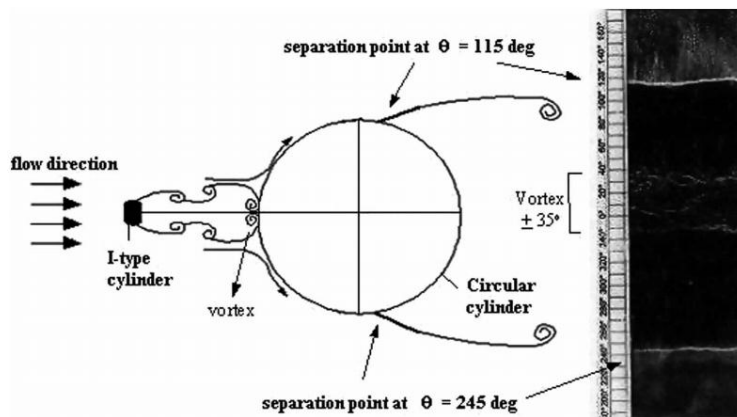
3. Mengetahui pengaruh *fin pitch* pada silinder terhadap koefisien tekanan (C_p) di permukaan silinder dan fin berdasar atas data dari simulasi numerik.
4. Mengetahui fenomena aliran yang melintasi silinder sirkular dan silinder bersirip di daerah *wake*.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Boundary Layer*

Aliran yang melewati suatu benda dengan viskositas fluida tertentu, akan menimbulkan tegangan geser yang dimulai pada titik *stagnasi* sebagai interaksi antara fluida yang mengalir dan permukaan benda yang diam, maka fluida akan terdeformasi secara kontinu. Gradien kecepatan akan terbentuk dengan kecepatan terkecil pada daerah dekat *wall* dan semakin jauh dari *wall* kecepatan bertambah hingga kecepatan *freestream*. *Boundary layer* digolongkan menjadi *boundary layer* laminar dan turbulen. Parameter yang mengatur perubahan *boundary layer* dari laminar menuju transisi dan turbulen adalah bilangan Reynolds.

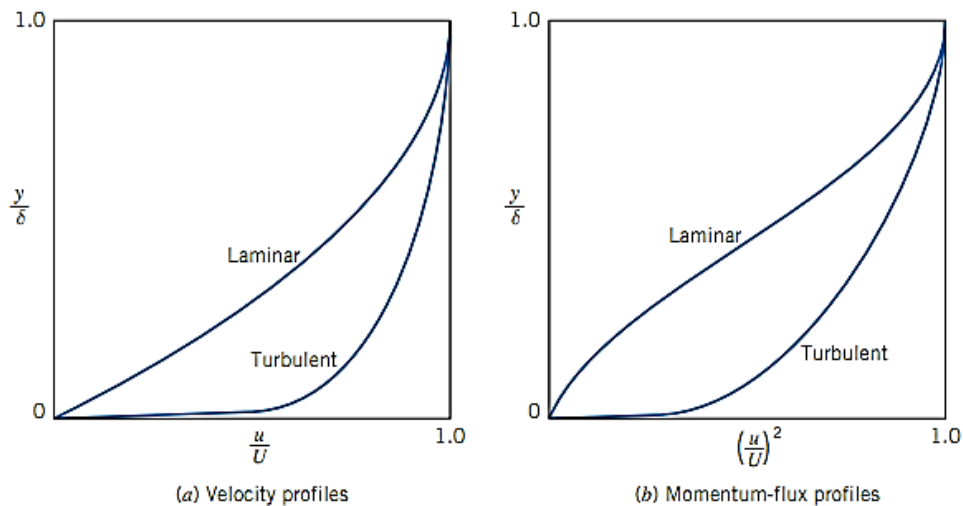


Gambar 2.1 Visualisasi aliran pada permukaan silinder dengan silinder terpotong pada upstream, $Re = 5,3 \times 10^4$ (Triyogi dkk, 2009)

Pada gambar 2.1 ditunjukkan bahwa pada kondisi tertentu perubahan *boundary layer* bergantung pada gangguan yang dialami suatu aliran, sehingga diperoleh aliran turbulen sebelum bilangan Reynolds kritis untuk perubahan menuju *boundary layer* turbulen tercapai. Penambahan silinder terpotong sebagai pengganggu pada *upstream* yang dilakukan menjadikan aliran turbulen sampai di permukaan silinder. Hal tersebut bertujuan untuk mereduksi *drag* pada silinder, karena aliran turbulen memiliki momentum yang lebih besar daripada aliran laminar, sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2.2 (a) dan 2.2 (b). Profil kecepatan



aliran turbulen lebih penuh dibandingkan profil kecepatan aliran laminar. Hal yang sama juga dapat dilihat pada profil fluks momentum aliran turbulen yang lebih besar dibandingkan pada aliran laminar. Sehingga, profil aliran turbulen dapat menunda separasi aliran pada sebuah kasus aliran yang memungkinkan terjadinya *adverse pressure gradient*.



Gambar 2.2 Profil *nondimensional* aliran *boundary layer* (Fox dkk, 2010)

2.2 Karakteristik Aliran di Sekitar Silinder

Aliran yang melalui suatu benda akan menghasilkan karakteristik aliran yang sangat tergantung pada beberapa parameter fisik, diantaranya; bentuk benda, kondisi permukaan, maupun orientasi benda yang dilintasi. Parameter lain yang mempengaruhi karakter aliran luar (*external flow*) adalah parameter tak berdimensi (*dimensionless parameters*), yaitu bilangan Reynolds dan bilangan *Mach*. Bilangan Reynolds merupakan perbandingan efek inersia dan efek viskos sebagaimana dirumuskan sebagai berikut,

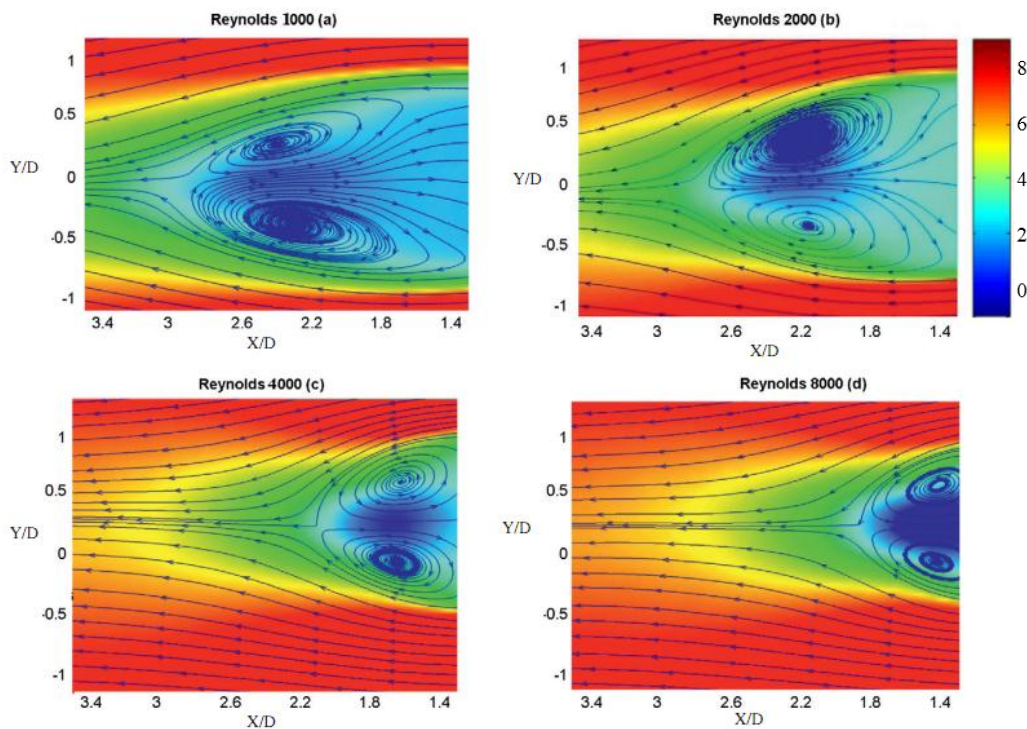
$$Re = \frac{\rho U d}{\mu} \quad (2.1)$$

Peningkatan bilangan Reynolds pada aliran yang melewati *bluff body* mengakibatkan efek viskos di depan daerah yang dekat permukaan silinder semakin berkurang dan sebaliknya pada daerah *downstream* akan terbentuk olakan (*wake*). Efek inersia fluida menjadi penting karena fluida yang mengalir tidak dapat



mengikuti lintasan melengkung silinder, sehingga pada permukaan benda terbentuk separasi aliran.

Pada gambar 2.3 ditunjukkan daerah yang dibatasi oleh garis separasi adalah daerah *wake* atau gelembung separasi yang mengalir ke arah *upstream*, sehingga memberikan kontribusi terhadap *drag* yang terjadi. Hal lain yang dapat ditunjukkan dari Gambar 2.3 adalah dengan peningkatan bilangan Reynolds, luas daerah *wake* semakin kecil. Hal ini sesuai dengan kenyataan bahwa pada bilangan Reynolds rendah, separasi aliran terbentuk lebih awal.



Gambar 2.3 Medan kecepatan aliran rata-rata di belakang silinder (X dan $Y = 0$ pada sumbu silinder) dengan bilangan Reynolds berbeda (Khashehchi dkk, 2014)

Penambahan benda pada permukaan silinder atau di daerah *upstream* akan menghasilkan pola aliran yang berbeda sebelum ditambahkan. Hal tersebut bertujuan mereduksi *drag* atau karena kebutuhan pendinginan silinder dengan menambahkan *annular fin*. Penelitian tentang aliran fluida melewati silinder bersirip telah dilakukan oleh beberapa peneliti, Khashehchi dkk (2014) mengamati karakteristik aliran di belakang silinder bersirip dan *foamed cylinder*. Pengukuran



dilakukan dengan PIV (*Particle Image Velocimetry*) pada *wind tunnel*, sedangkan objek penelitian yang diamati yaitu silinder sirkular, silinder bersirip, dan *foamed cylinder* pada bilangan Reynolds antara 1.000 s/d 10.000. Pada eksperimen tersebut dihasilkan bahwa ukuran struktur aliran turbulen di belakang silinder bertambah besar ketika fin atau *foam* ditambahkan pada silinder. Pada silinder polos dan silinder bersirip didapatkan pola aliran yang sama, yaitu peningkatan bilangan Reynolds berbanding terbalik dengan ukuran pada daerah formasi *vorteks*.

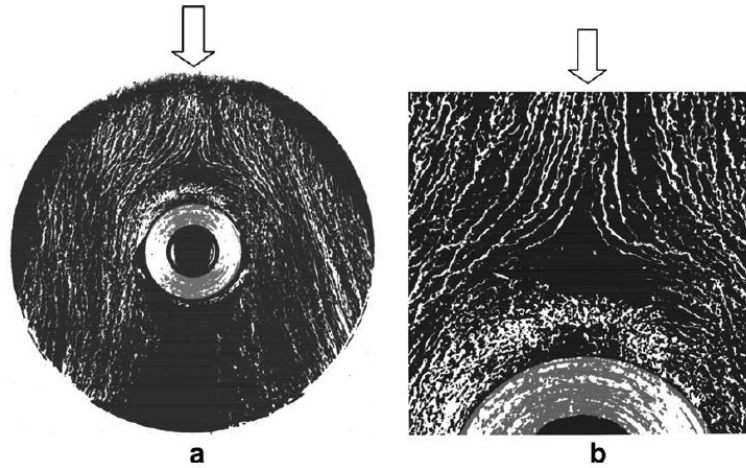
Ishima dkk (2008) melakukan penelitian untuk mengetahui karakteristik aliran di sekitar silinder bersirip dengan kemiringan tertentu untuk memperoleh data eksperimental yang dapat diverifikasi dengan simulasi numerik. Eksperimen tersebut dilakukan dengan menggunakan PIV and LDA (*Laser Doppler Anemometer*). Variasi penelitian yang dilakukan yaitu kemiringan silinder tanpa dan dengan fin pada kemiringan 0,15, dan 30 derajat dari garis vertikal dengan kecepatan rata-rata 3,8 m/s dan intensitas turbulen relatif 1,5 %.

Kemiringan silinder mengakibatkan daerah olakan semakin panjang dan komponen kecepatan yang tegak lurus dengan arah *main stream* memiliki perbedaan yang besar dengan komponen kecepatan silinder miring. Pada silinder tanpa fin, daerah olakan terpanjang pada kemiringan 15 derajat dibandingkan dengan kemiringan 0 derajat dan 30 derajat, sedangkan pada silinder bersirip, medan aliran menjadi lebih rumit khususnya daerah di dekat silinder. Aliran di sekitar silinder bersirip dengan kemiringan 0 derajat hampir sama dengan silinder tanpa sirip. Namun ketika silinder bersirip dimiringkan dihasilkan peningkatan *wake*. Selain itu, fin menjadikan aliran lebih kompleks serta silinder bersirip ekuivalen dengan silinder diameter yang lebih besar.

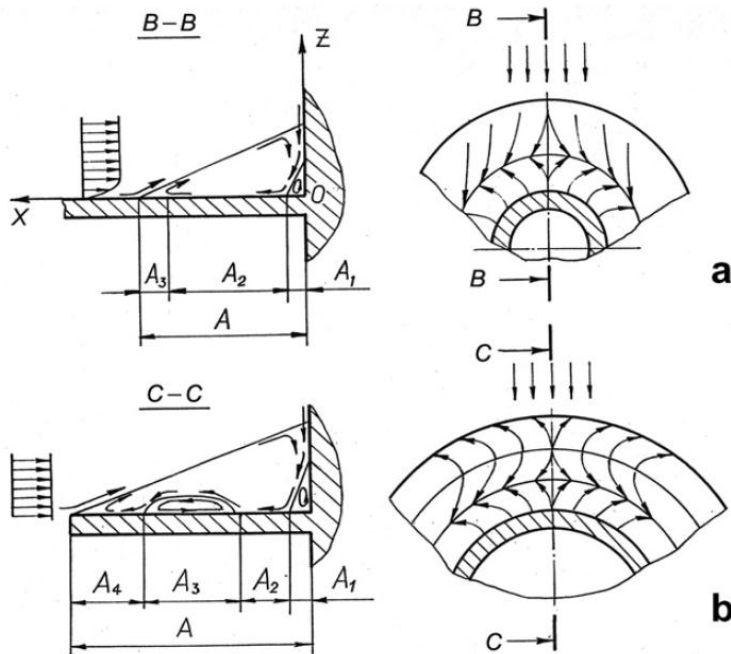
Pis'mennyi (2012) meneliti keteraturan aliran dan perpindahan panas pada permukaan tabung bersirip. Visualisasi aliran, distribusi tekanan, dan perpindahan panas lokal pada permukaan fin diamati pada bilangan Reynolds antara $1,0 \times 10^4$ sampai dengan $6,6 \times 10^4$. Percobaan dilakukan pada dua belas jenis tabung bersirip, dengan parameter desain bervariasi dalam kisaran diameter silinder (d) 21 mm - 85,5 mm, panjang fin (h) 12 mm - 48,5 mm, jarak antar fin (t) 4 mm - 20 mm dan



h/d 0,263-1,905. Pengamatan baris pertama dari susunan fin ditampilkan pada gambar 2.4 dan 2.5.



Gambar 2.4 (a) Arus pada sirip dan (b) fragmen di depan silinder bersirip: $h/d = 1,429$; $h = 30$ mm; $t = 4$ mm; $d = 1,2$ mm; baris 1 dari susunan dengan $Re = 2,6 \times 10^4$ (Pis'mennyi, 2012)



Gambar 2.5 Pola aliran di depan silinder bersirip, (a) pada panjang fin relatif ($h/d > 0,4$) dan (b) pada nilai kecil h/d ($h/d < 0,4$); A - zona arus sirkulasi sekunder; A_1 , A_3 - zona separasi aliran dari permukaan fin; A_2 , A_4 - zona keterikatan aliran (Pis'mennyi, 2012)



Pada gambar 2.4 di atas ditampilkan bahwa *displacement* aliran dari saluran antar fin karena pertumbuhan ketebalan *boundary layer* pada sirip terlihat dengan jelas. Akibatnya, arus yang berada di bawah *mid section*, garis-garis zona vorteks di belakang silinder bersirip menyimpang dalam arah yang berbeda dari sumbu longitudinal gambar dan memiliki lengkungan berlawanan dengan karakteristik *cross flow* di sekitar silinder halus.

Pada gambar 2.5, zona A sebagai bentuk perilaku aliran 3D di dekat dasar fin. Perbedaan kecepatan di dekat permukaan fin dan di inti ruang antar fin terjadi karena perkembangan *boundary layer*, ketika aliran pada dinding silinder bersirip mengalami penurunan tekanan sepanjang sumbu OZ yang menyebabkan udara bergerak dari saluran pusat antar fin ke basis fin. Aliran sekunder mengalir pada permukaan sirip atas bagian A₂ membentuk sudut kecil wilayah separasi aliran A₁ yang terlihat pada gambar 2.4 (b) sebagai pita gelap pertama di A, sedangkan aliran pada zona A₂ sebagai pita terang. Pada batas-batas aliran zona ini dapat dicirikan sebagai *counter flow* ke aliran utama.

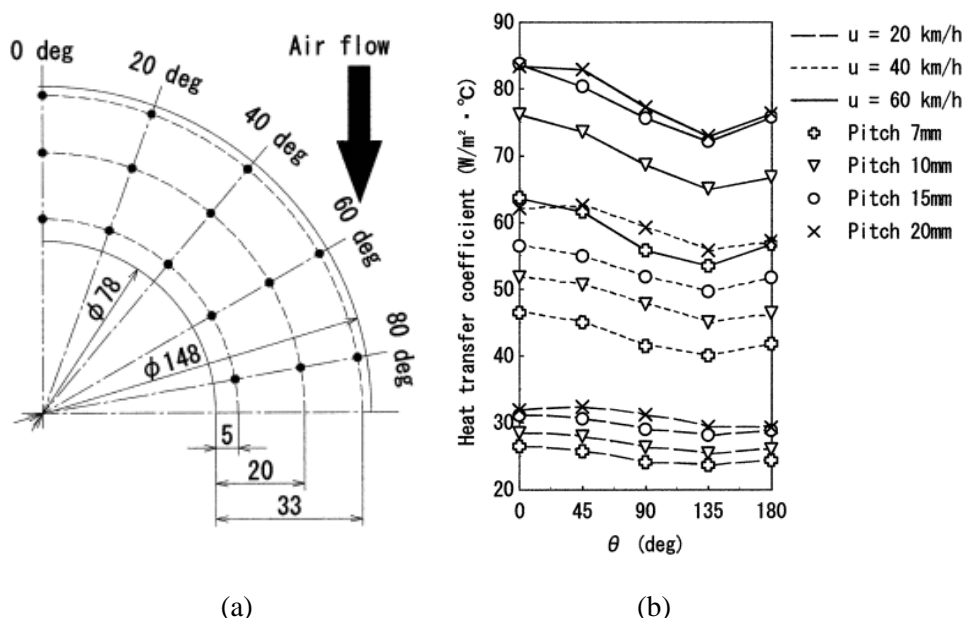
Ketika arus sekunder dan arus utama bertemu, terjadi separasi aliran dari permukaan fin. Bagian separasi aliran A₃ terlihat pada gambar 2.4 (b) sebagai pita gelap eksternal dari zona A. Sedangkan variasi perbandingan panjang fin yang lebih kecil, terbentuk pola aliran pada permukaan fin yang berbeda dibandingkan variasi panjang fin yang lebih besar. Permukaan fin seluruhnya terjadi olakan, sehingga aliran utama (*freestream*) akan terseparasi lebih awal ketika memasuki permukaan fin.

Yoshida dkk (2006) telah meneliti pengaruh jarak antar fin, jumlah fin dan kecepatan udara pada pendinginan mesin sepeda motor dengan metode eksperimen menggunakan *wind tunnel eiffel-type* dengan tinggi nozel 680 mm dan lebar 400 mm, maksimum kecepatan udara *wind tunnel* 72 km/jam. Penelitian dilakukan pada silinder dengan diameter luar dan diameter dalam masing-masing 78 mm dan 62 mm. Pengamatan yang dilakukan pada variasi jarak antar fin 7 mm - 20 mm, jumlah fin 1 - 16, dan kecepatan udara 0, 20 km/jam, 40 km/jam, dan 60 km/jam. Temperatur diameter dalam silinder dijaga konstan 100 °C untuk mendapatkan



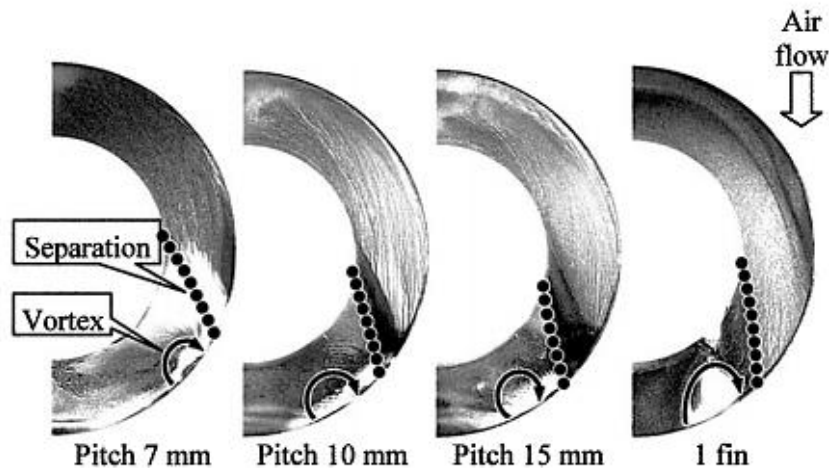
koefisien perpindahan panas pada permukaan fin, sedangkan temperatur lingkungan $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Salah satu hasil penelitian Yoshida dkk (2006) ditampilkan pada gambar 2.6. dan 2.7. Pada penelitian tersebut disimpulkan bahwa untuk meningkatkan pendinginan, maka jumlah fin harus ditingkatkan. Namun pendinginan akan berkurang dengan jarak antar fin yang sempit saat kecepatan aliran udara rendah sebagaimana ditampilkan pada gambar 2.6. Koefisien perpindahan panas terbesar dan terkecil masing-masing didapatkan pada *fin pitch* 20 mm dan 7 mm untuk setiap variasi kecepatan. Bahkan untuk kecepatan 40 km/jam, koefisien perpindahan panas pada *fin pitch* 20 mm sedikit lebih besar dibandingkan koefisien perpindahan panas pada *fin pitch* 7 mm dengan kecepatan 60 km/jam.



Gambar 2.6 (a) Titik pengambilan data, (b) Grafik pengaruh kecepatan udara dan *fin pitch* terhadap koefisien perpindahan panas pada titik 33 mm dari *root* fin (Yoshida dkk, 2006)

Fenomena di atas dapat dijelaskan pada gambar 2.7 dimana ditampilkan pengaruh *fin pitch* terhadap separasi aliran yang terjadi di permukaan fin. Terlihat bahwa separasi aliran terbentuk lebih awal pada jarak antar fin yang lebih sempit, sehingga terjadi peningkatan temperatur pada permukaan lokal fin. Hal ini menyebabkan udara mengalir kurang baik pada daerah antar fin. Pada kondisi tersebut terjadi overlap *thermal boundary layer* pada permukaan fin.



Gambar 2.7 Pengamatan pola aliran pada fin (Yoshida dkk, 2006)

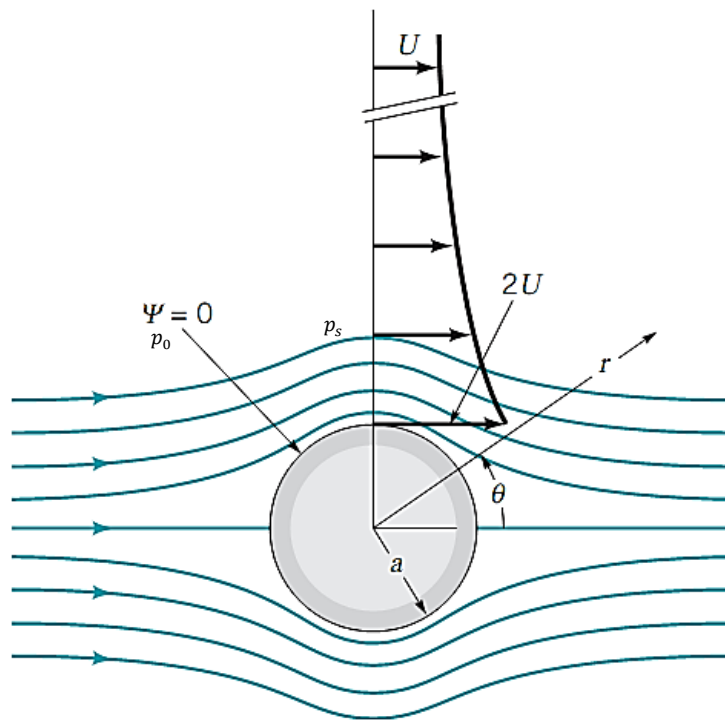
2.3 Drag

Fluida yang mengalir melalui sebuah benda dalam kondisi benda terendam pada medan aliran fluida, maka benda tersebut akan mengalami gaya-gaya akibat interaksi dengan fluida di sekelilingnya. Interaksi tersebut khususnya pada daerah *boundary layer* yang dapat menyebabkan transisi aliran laminar menjadi turbulen. Proses transisi ini menimbulkan sparasi aliran yang sangat tergantung pada bentuk benda, orientasi, kecepatan *freestream*, sifat fluida dan kondisi permukaan benda. Umumnya benda yang bentuknya ramping (*streamlined*) akan mendapatkan pengaruh lebih kecil akibat interaksi dengan fluida di sekitarnya, dibandingkan pengaruh fluida terhadap benda tumpul (*bluff body*).

Interaksi antara fluida dan benda adalah gaya pertemuan antar permukaan keduanya, berupa tegangan geser sebagai pengaruh viskositas dan tegangan normal akibat tekanan. Resultan gaya yang searah dengan *freestream* disebut *drag*, sedangkan resultan gaya yang tegak lurus terhadap arah kecepatan *freestream* disebut *lift*. *Drag* dapat disebabkan oleh tegangan geser maupun tekanan, *drag* pada benda *streamlined* sebagian besar disebabkan oleh tegangan geser dan pada benda *bluff body* didominasi oleh perbedaan tekanan di bagian depan dan belakang benda (*adverse pressure gradient*). Namun pada kondisi tertentu (utamanya pada fluida dengan viskositas tinggi), tegangan geser maupun tekanan akan memberikan kontribusi terhadap *drag* yang cukup signifikan.



Pada silinder sirkular yang termasuk benda *bluff body* sebagaimana ditampilkan pada gambar 2.8, permukaan silinder yang melengkung menyebabkan tekanan bervariasi sepanjang permukaan benda ketika dilalui aliran fluida. Perbedaan ini disebabkan oleh variasi kecepatan fluida sepanjang tepi *boundary layer* akibat bidang melengkung tersebut. Distribusi tekanan dapat diperoleh dari persamaan Bernoulli dengan asumsi aliran *inviscid* dan Δz diabaikan dari sebuah titik yang jauh dari permukaan silinder yang tekanan dan kecepatannya adalah p_0 dan U sebagai berikut,



Gambar 2.8 Aliran *inviscid* di sekitar silinder sirkular (Munson dkk, 2009)

$$p_0 + \frac{1}{2} \rho U^2 + \rho g z = p_s + \frac{1}{2} \rho v_{\theta s}^2 + \rho g z \quad (2.2)$$

Karena kecepatan maksimum pada aliran yang melalui silinder terletak pada $\theta = 90^\circ$, maka distribusi kecepatan dipermukaan silinder dinyatakan dengan,

$$v_{\theta s} = -2U \sin \theta$$

Sehingga tekanan pada permukaan benda secara ideal dapat dinyatakan sebagai berikut,



$$p_s = p_0 + \frac{1}{2}\rho U^2(1 - 4\sin^2\theta) \quad (2.3)$$

Distribusi tekanan pada silinder dapat juga dituliskan dalam bentuk koefisien tekanan *nondimensional*, C_p

$$C_p = \frac{p_s - p_0}{\frac{1}{2}\rho U^2} \quad (2.4)$$

Keterangan:

C_p : koefisien tekanan

p_0 : tekanan statis

p_s : tekanan statis permukaan silinder

ρ : massa jenis fluida

U : kecepatan *freestream*

θ : sudut titik yang diamati dari sumbu simetris horizontal silinder

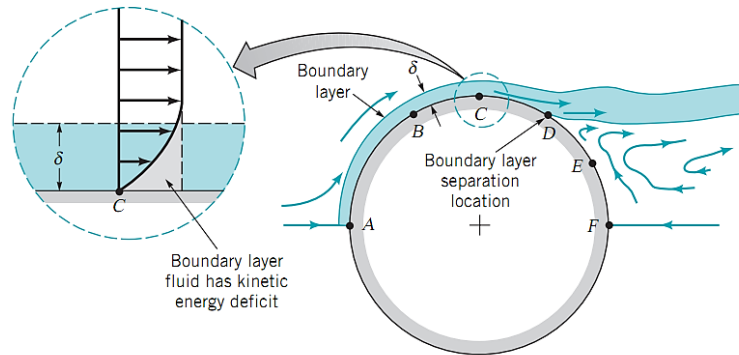
$v_{\theta s}$: kecepatan di permukaan silinder sebagai fungsi sudut

Asumsi aliran *inviscid* yang mengabaikan efek viskos memungkinkan partikel fluida yang bergerak dari depan ke belakang silinder tanpa kehilangan energi sedikitpun, sehingga terbentuk distribusi tekanan yang simetris. Sedangkan fluida viskos yang merupakan kondisi *real*, menyebabkan terjadinya gradien tekanan balik (*adverse pressure gradient*) pada separuh bagian belakang silinder. Pada gambar 2.9 (b) ditampilkan perbandingan kedua aliran tersebut, terlihat bahwa bagian *upstream* terdapat kesesuaian antara aliran *inviscid* secara teoritis dan aliran *viscous*, dari hasil eksperimen.

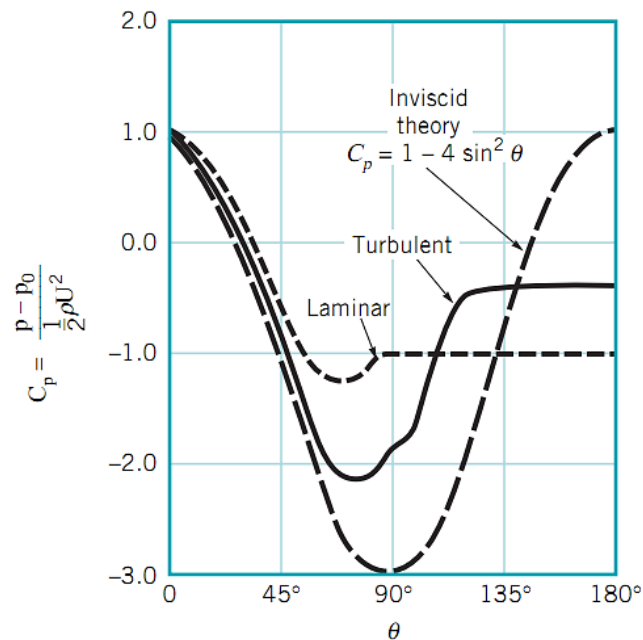
Visualisasi aliran viskos melintasi sebuah silinder terlihat pada gambar 2.9 (a). *Boundary layer* viskos akan terus berkembang pada permukaan silinder dari titik stagnasi. Partikel di dalam *boundary layer* akan kehilangan energi kinetik selama mengalir sehingga menyebabkan partikel tidak memiliki cukup momentum untuk melintasi permukaan dengan tekanan yang ada sampai di titik F . Hal ini menyebabkan separasi aliran di permukaan silinder dan membentuk *wake* di belakang silinder yang berkontribusi terhadap *drag* yang terjadi. Fenomena tersebut



menjadikan perbedaan besar antara aliran *inviscid* (aliran tanpa gesekan) dan aliran hasil eksperimen di bagian *downstream*.



(a)



(b)

Gambar 2.9 (a) Lokasi separasi aliran *boundary layer*, (b) Distribusi tekanan permukaan untuk aliran *inviscid* dan aliran *boundary layer* (Munson dkk, 2009)

Hubungan antara distribusi tekanan dipermukaan benda dan *drag* tekanan diperoleh dari persamaan berikut,

$$F_p = \int p \cos \theta dA \quad (2.5)$$

yang dapat dituliskan kembali dalam koefisien *drag* tekanan, C_{Dp}

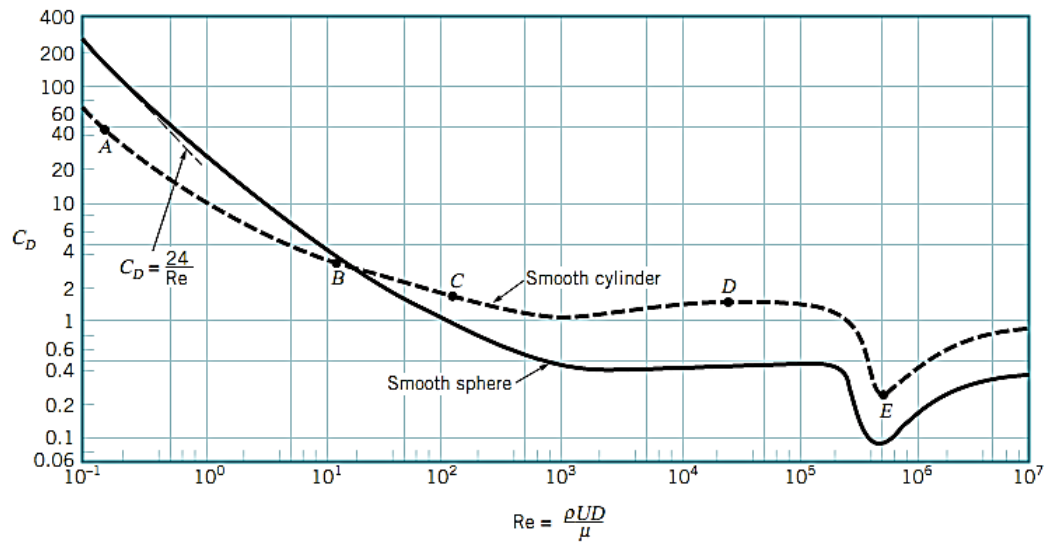


$$C_{D_P} = \frac{F_P}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} = \frac{\int p \cos \theta dA}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} = \frac{\int C_P \cos \theta dA}{A}$$
$$C_{D_P} = \int_0^\pi C_P \cos \theta d\theta \quad (2.6)$$

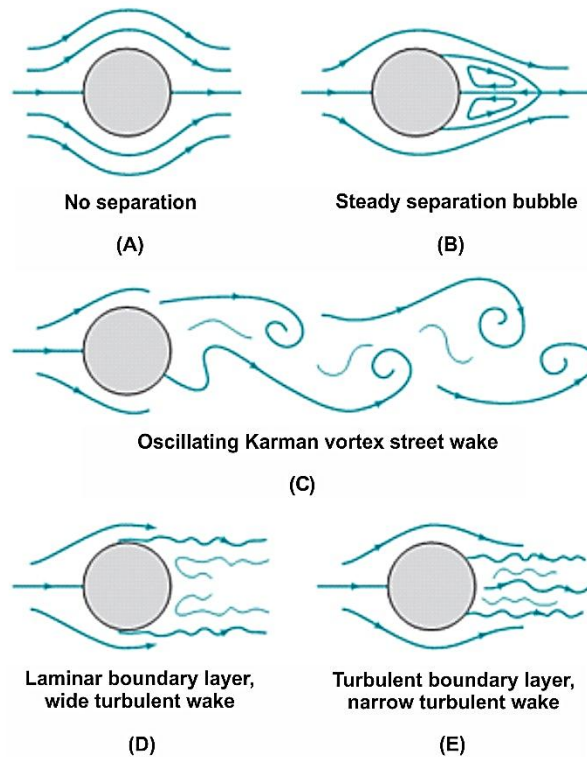
Pada persamaan 2.6, A merupakan luas frontal, yaitu luas proyeksi dari arah yang sejajar dengan kecepatan *free-stream* U . Pada silinder dengan arah aliran tegak lurus dengan tinggi silinder, maka luas frontal adalah hasil perkalian diameter, d dan tinggi silinder, L .

Sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya bahwa bilangan Re merupakan parameter yang cukup penting pada analisa aliran fluida. Pada gambar 2.10 (a) dapat dilihat grafik hubungan koefisien *drag* dan bilangan Re . Peningkatan bilangan Re menyebabkan penurunan *drag*, bahkan pada peningkatan Re dari $1,5 \times 10^5$ sampai $3,5 \times 10^6$ *boundary layer* pada silinder berubah dari laminar, transisi dan akhirnya menjadi turbulen sehingga menyebabkan penurunan *drag* yang cukup signifikan. Visualisasi aliran pada batas nilai Re ini ditampilkan pada titik D dan E. *Boundary layer* aliran turbulen akan bergerak jauh sepanjang permukaan silinder sebelum terjadi separasi. Pada kondisi tersebut titik separasi akan bergeser sampai berada 140° di belakang silinder.

Pada gambar 2.10 (b) ditampilkan visualisasi aliran untuk masing-masing titik A, B, C, D, dan E yang dipilih dari Gambar 2.10 (a). Pada nilai $Re < 5$ tidak terjadi separasi aliran hingga nilai $Re > 40$ terjadi pelepasan vorteks (*vortex shedding*). Vorteks tersebut akan menimbulkan gaya-gaya (gaya lift dan gaya *drag*) yang bekerja pada silinder yang bervariasi secara periodik. Ketika nilai Re berada diantara $300 < Re < 1,5 \times 10^5$, lapisan batas laminar terpisah sekitar 80° dan terjadi pelepasan vorteks yang kuat dan periodik.



(a)



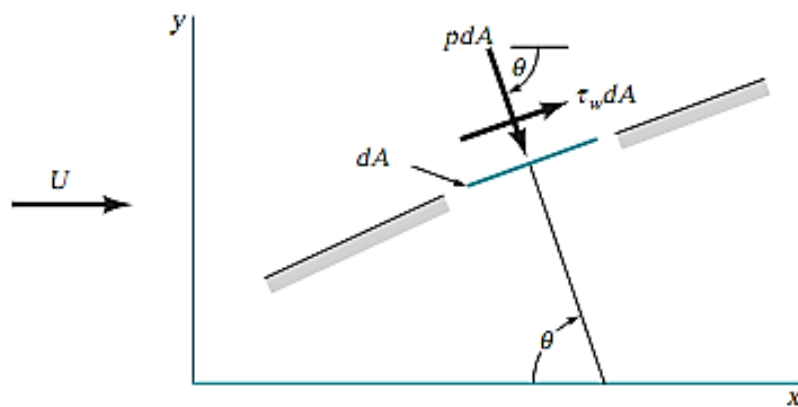
(b)

Gambar 2.10 (a) Koefisien *drag* sebagai fungsi bilangan Reynolds untuk silinder bundar dan bola licin, (b) Pola aliran dari aliran yang melewati sebuah silinder bundar pada berbagai bilangan Re (Munson dkk, 2009)

Pada silinder bundar, permukaan benda akan terdiri dari bagian yang sejajar dan tegak lurus terhadap aliran *freestream* sebagaimana ditampilkan pada



gambar 2.11. Kondisi aliran yang tegak lurus terhadap permukaan, *drag* sepenuhnya dipengaruhi oleh *pressure force* sebagaimana telah diuraikan di atas. Sedangkan bagian permukaan benda yang sejajar dengan aliran, *drag* yang terjadi dipengaruhi oleh *skin friction force*, yaitu gaya yang menyinggung permukaan secara tangensial sebagai akibat adanya efek viskositas. Pada benda yang berada dalam medan aliran udara yang viskositasnya kecil, kontribusi tegangan geser terhadap *drag* cukup kecil.



Gambar 2.11 Gaya tekan dan gaya geser pada elemen kecil dari permukaan benda (Munson dkk, 2009)

Komponen gaya-gaya yang bekerja pada permukaan benda dari Gambar 2.11 dituliskan sebagai berikut:

$$dF_x = (p dA) \cos \theta + (\tau_w dA) \sin \theta \quad (2.7)$$

$$dF_y = -(p dA) \sin \theta + (\tau_w dA) \cos \theta \quad (2.8)$$

Resultan gaya ke arah sumbu-*x* atau sejajar dengan kecepatan *freestream* adalah *drag*, sedangkan resultan gaya ke arah sumbu-*y* adalah gaya *lift*. Pada benda simetris pengaruh gaya *lift* dapat diabaikan, sedangkan gaya hambat yang terbentuk dapat didefinisikan sebagai berikut,

$$F_d = F_{d,p} + F_{d,f} \quad (2.9)$$

$$F_d = \int p \cos \theta dA + \int \tau_w \sin \theta dA \quad (2.10)$$

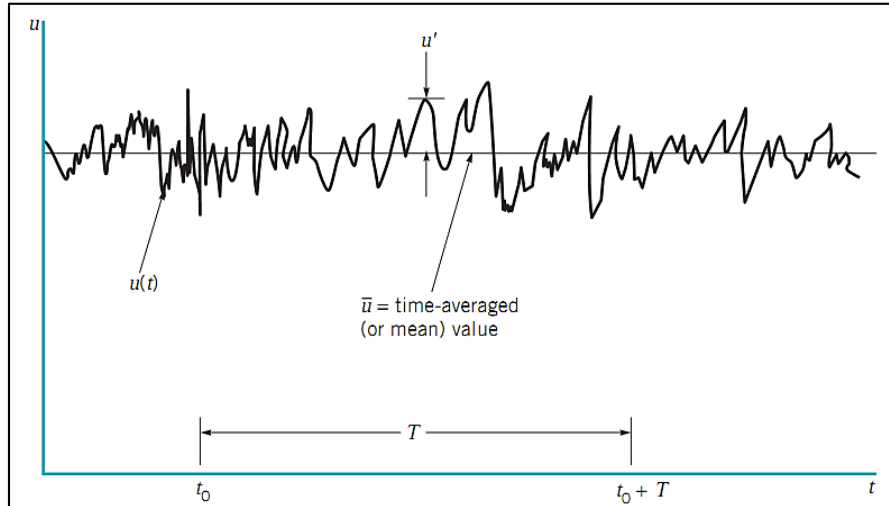


Sehingga koefisien *drag* gesekan, C_{D_f} dinyatakan sebagai berikut,

$$C_{D_f} = \frac{F_f}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} = \frac{\int \tau_w \sin \theta dA}{\frac{1}{2}\rho U^2 A}$$
$$C_{D_f} = \frac{2}{\rho U^2} \int_0^\pi \tau_w \sin \theta d\theta \quad (2.11)$$

2.4 Intensitas Turbulensi (IT)

Sifat yang tidak beraturan dan acak menjadi ciri khas pada aliran turbulen, diantara parameter yang dapat digunakan untuk menggambarkan keacakan aliran turbulen adalah intensitas turbulensi. Aliran turbulen dapat digambarkan dalam nilai rata-rata kecepatannya (\bar{u}) dan nilai kecepatan yang berfluktuasi (u'). Pada gambar 2.12 ditampilkan gambar deskripsi rata-rata terhadap waktu dan fluktuasi dari sebuah parameter aliran turbulen, nilai kecepatan rata-rata menurut waktu dapat dinyatakan sebagai berikut:



Gambar 2.12 Deskripsi rata-rata terhadap waktu dan fluktuasi dari sebuah parameter aliran turbulen (Munson dkk, 2009)

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u(t) dt \quad (2.12)$$

Fluktuasi turbulen dinyatakan dengan persamaan:

$$u = \bar{u} + u' \text{ atau } u' = u - \bar{u} \quad (2.13)$$



Kekuatan turbulensi dinyatakan dengan akar dari rata-rata kuadrat kecepatan fluktuatif (u_{rms})

$$u_{rms} = \sqrt{\overline{(u')^2}} \quad (2.14)$$

Intensitas turbulensi didefinisikan sebagai akar dari rata-rata kuadrat kecepatan fluktuatif dibagi dengan kecepatan rata-rata menurut waktu, atau dapat ditulis:

$$IT = \frac{\sqrt{\overline{(u')^2}}}{\bar{u}} \times 100 \% \quad (2.15)$$

Dimana,

IT = Intensitas turbulensi

u' = Fluktuasi kecepatan (m/s)

\bar{u} = Kecepatan rata-rata (m/s)

Berdasarkan persamaan 2.15, nilai intensitas turbulensi akan semakin besar dengan peningkatan fluktuasi kecepatan.

2.5 Pengaturan Besaran Turbulen pada Fluent

Simulasi numerik pada penelitian ini menggunakan model turbulen, sehingga pada sisi domain aliran *inlet* pengaturan besaran turbulen menggunakan persamaan-persamaan berikut yang dikutip dari Fluent Inc. (2006).

a. Intensitas turbulensi

Intensitas turbulensi I adalah perbandingan antara akar rata-rata dari fluktuasi kecepatan u' terhadap kecepatan rata-rata u_{avg} . Intensitas turbulensi sebesar 1 % atau kurang dianggap rendah, sedangkan intensitas turbulensi sebesar 10 % atau lebih dianggap cukup besar. Idealnya untuk pengambilan data harus diberikan estimasi intensitas turbulensi yang baik pada *inlet boundary*. Simulasi yang dilakukan dengan sebuah *wind tunnel*, intensitas *freestream* sesuai dengan karakteristik *wind tunnel*. Pada simulasi CFD intensitas turbulensi pada inlet secara umum dapat diperkirakan dari beberapa contoh berikut:



1. *High turbulence case*, yaitu aliran dengan kecepatan tinggi pada geometri yang kompleks seperti alat penukar kalor, turbin, dan kompressor. Intensitas turbulensi pada kasus ini antara 5% - 20%.
2. *Medium turbulence case*, yaitu aliran yang melalui pipa besar atau aliran dengan Re rendah. Intensitas turbulensi pada kasus ini antara 1% - 5%
3. *Low turbulence case*, yaitu aliran melintasi mobil, kapal dan pesawat. Intensitas turbulensi pada kasus ini dapat di bawah 1%.

Intensitas turbulensi untuk aliran *fully developed* dapat diperkirakan dengan menggunakan persamaan berikut yang diturunkan dari hubungan empirik aliran pipa.

$$IT \equiv \frac{u'}{\bar{u}} = 0.16(Re_{D_H})^{-1/8} \quad (2.16)$$

b. Skala Panjang Turbulensi (*Turbulence Length Scale*) dan Diameter Hidraulik

Turbulence length scale, ℓ adalah besaran yang berhubungan dengan ukuran *large eddies* yang membawa energi pada aliran turbulen. Pada aliran *fully developed*, ℓ dibatasi oleh ukuran saluran, sehingga *vortex* tidak dapat lebih besar daripada saluran. Hubungan antara ℓ dan ukuran saluran dinyatakan dengan persamaan berikut,

$$\ell = 0,07D_H \quad (2.17)$$

Aliran pada saluran berbentuk kotak atau selain lingkaran, D_H merupakan diameter hidrolis, yang ditentukan dengan persamaan berikut:

$$D_H = \frac{4A_C}{P} \quad (2.18)$$

Keterangan:

IT : Intensitas turbulen (%)

Re_{D_H} : Bilangan Reynolds berdasarkan diameter hidrolis

ℓ : Skala panjang turbulen (mm)

D_H : Diameter hidrolis (mm)

P : Keliling objek (mm)

A_C : Luas frontal *cross section* (mm²)



“Halaman ini sengaja dikosongkan”



BAB 3

METODE PENELITIAN

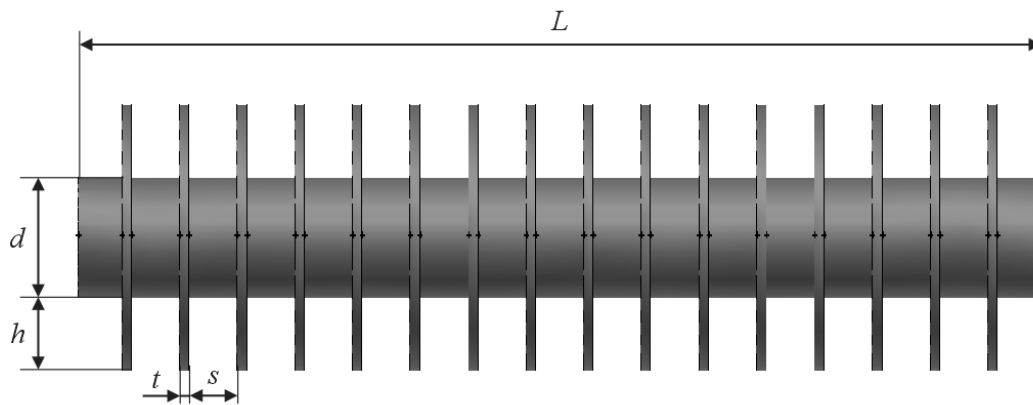
Penelitian ini akan dilakukan secara eksperimen pada *wind tunnel* dan simulasi numerik menggunakan *software* Gambit 2.4 dan Fluent 6.3. Uraian dari simulasi numerik, eksperimen, dan objek penelitian akan dijelaskan pada paragraf-paragraf berikut:

3.1 Model dan Variasi Penelitian

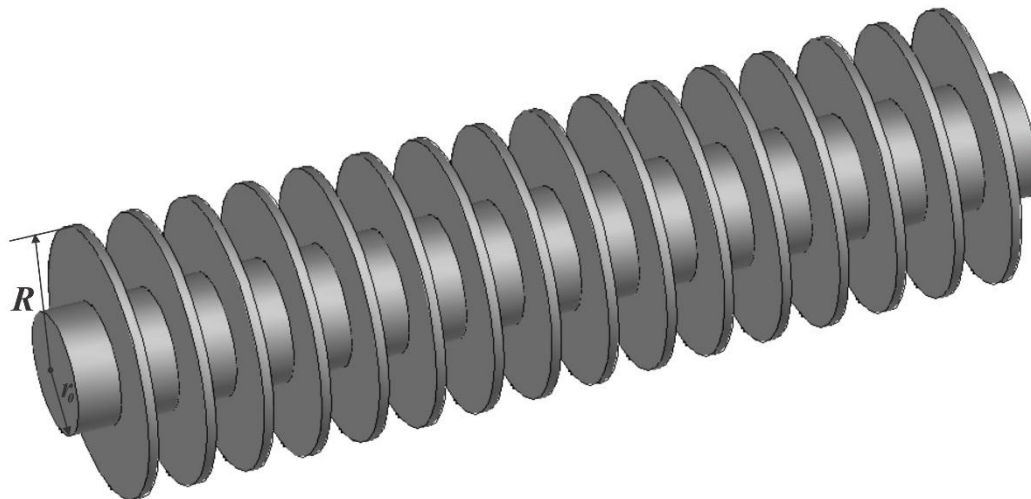
Pada gambar 3.1 ditampilkan salah satu silinder bersirip dengan variasi jarak antar fin 10 mm yang digunakan pada penelitian ini. Parameter penelitian yang digunakan secara lengkap ditampilkan pada tabel 3.1. Diameter silinder, panjang silinder, panjang fin, dan tebal fin adalah variabel yang tetap konstan. Variabel yang diubah adalah jarak antar fin, yaitu 10 mm, 14 mm, dan 18 mm. Jarak antar fin dan panjang fin yang dipilih berada pada batas nilai eksperimen yang dilakukan oleh Pis'mennyi (2012), yaitu masing-masing 4 mm s/d 20 mm dan 12.0 mm s/d 48.5 mm. Geometri yang digunakan pada penelitian tersebut telah disesuaikan dengan parameter yang banyak diterapkan di industri. Selain itu penentuan dimensi objek penelitian telah disesuaikan dengan dimensi *wind tunnel* agar *blockage ratio* tidak lebih dari 10 %.

Tabel 3. 1 Dimensi Objek dan Variasi Penelitian

No.	Objek	Diameter silinder, d (mm)	Panjang silinder, L (mm)	Panjang fin, h (mm)	Jarak antar fin, s (mm)			Tebal fin, t (mm)
1.	<i>Finned Cylinder</i>	25	200	15	10	14	18	2
2.	<i>Bare Cylinder</i>	25	200	-	-	-	-	-



(a)



(b)

Keterangan:

d = diameter silinder

h = panjang fin

L = panjang silinder

r_o = jari-jari silinder

t = tebal fin

s = jarak antar fin (*fin pitch*)

R = jari-jari fin

Gambar 3.1 Model objek penelitian $s = 10$ mm dan $h = 15$ mm, (a) tampak luas frontal dan (b) tampak isometri.

3.2 Simulasi Numerik dengan Fluent 6.3

Pemodelan simulasi numerik pada penelitian ini menggunakan model 3D, karena variasi penelitian yang diuji adalah variasi jarak antar fin yang hanya dapat ditampilkan dengan model 3D. Langkah awal proses simulasi dilakukan dengan



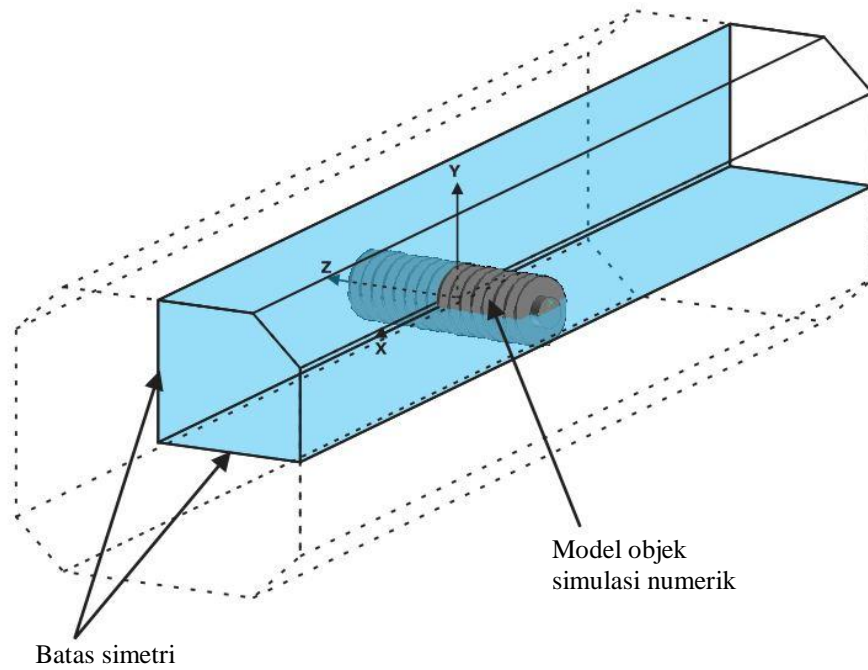
pembuatan model benda uji, pembuatan *mesh* pada domain simulasi numerik, penentuan kondisi batas dan parameter-parameter yang telah ditentukan.

Proses awal (*pre-processing*) dilakukan dengan menggunakan Gambit 2.4. Hasil *meshing* selanjutnya diekspor ke *software* Fluent 6.3 untuk dilanjutkan dengan proses (*processing*) berupa pengaturan model fisik dan parameter-parameter numerik lainnya. Langkah akhir (*post-processing*) dari proses simulasi numerik adalah menampilkan hasil serta analisa terhadap hasil yang telah diperoleh berupa data kuantitatif dan data kualitatif. Berikut ini dijelaskan pengaturan benda uji, domain aliran, bentuk *mesh*, dan langkah-langkah proses simulasi numerik pada penelitian ini.

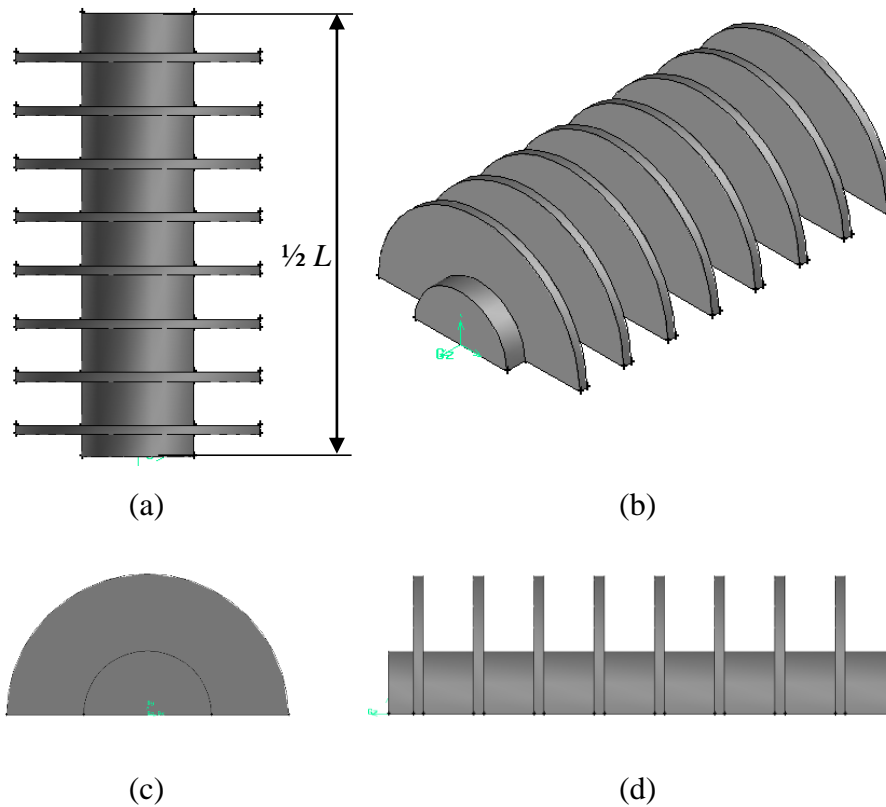
3.2.1 Model Benda Uji

Pada gambar 3.2 ditampilkan model benda dan domain aliran yang akan diamati dengan simulasi numerik. Silinder bersirip yang menjadi objek pengamatan pada penelitian ini merupakan bentuk benda yang simetris, demikian pula bentuk saluran yang digunakan. Pada kondisi *steady*, diperkirakan medan aliran yang terbentuk akan simetris, maka pada penelitian ini digunakan batas simetri (*symmetry boundary*).

Symmetry boundary digunakan untuk mengurangi daya komputasi yang dibutuhkan pada suatu kasus. Salah satu faktor yang menyebabkan daya komputasi cukup besar dalam simulasi numerik adalah jumlah *mesh* yang banyak, sehingga dengan menggunakan *symmetry boundary*, seluruh geometri dan domain aliran tidak perlu dimodelkan. Hal ini bertujuan untuk menghemat memori komputer dalam proses *meshing* maupun saat proses iterasi dilakukan. Berdasarkan hal tersebut, pemodelan objek hanya digambarkan seperempat dari seluruh domain aliran, maka panjang *span* menjadi $\frac{1}{2} L$ dari objek yang ditunjukkan pada gambar 3.1. Seperempat objek tersebut sebagaimana ditampilkan pada gambar 3.3. Sumbu koordinat berada di titik pusat silinder pada perpotongan simetris. Arah aliran yang diterapkan pada simulasi numerik ini sejajar dengan sumbu x dari arah x negatif.



Gambar 3.2 Model simetris 3D pada simulasi numerik silinder bersirip

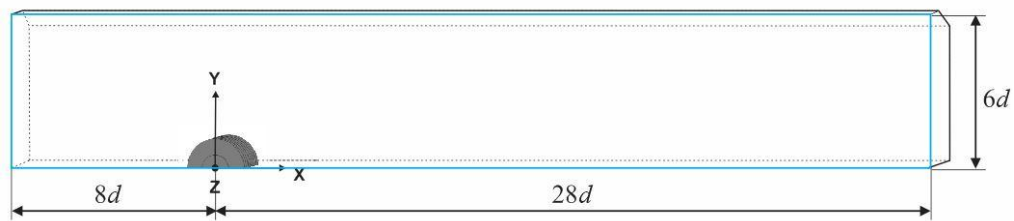


Gambar 3.3 Model objek penelitian simulasi numerik, (a) tampak atas, (b) tampak isometri, (c) tampak potongan simetri, dan (d) tampak depan

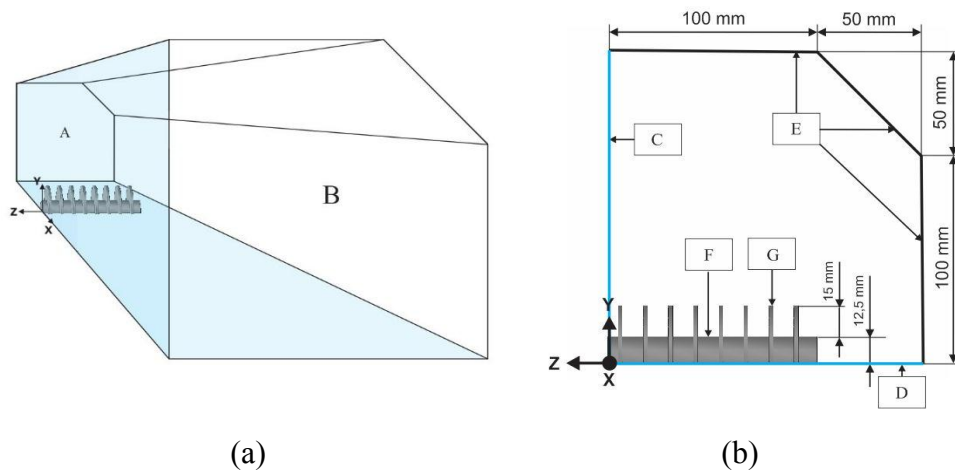


3.2.2 Domain Simulasi dan Kondisi Batas (*Boundary Condition*)

Domain simulasi dan kondisi batas ditunjukkan pada gambar 3.4 dan 3.5. Pada gambar 3.4 domain simulasi numerik ditentukan masing-masing $8d$ dan $28d$ dari sisi *inlet* dan sisi *outlet* terhadap titik pusat silinder. Jarak terhadap dinding atas sebesar $6d$ disesuaikan dengan dimensi *wind tunnel* pengujian eksperimen, dimana d adalah diameter silinder.



Gambar 3.4 Domain simulasi numerik



Keterangan :

A = *Inlet (velocity inlet)*

B = *Outlet (out flow)*

C = Potongan simetri 1 (*symmetry*)

D = Potongan simetri 2 (*symmetry*)

E = Dinding atas dan samping (*wall*)

F = Silinder (*wall*)

G = Fin (*wall*)

Gambar 3.5 Tipe *boundary* pada Gambit untuk simulasi numerik, (a) tampak isometri dan (b) tampak bidang YZ

Kondisi batas (*boundary condition*) dapat ditentukan saat pembuatan geometri pada *software* Gambit maupun ketika pengaturan model fisik pada *software* Fluent. Namun penentuan permukaan-permukaan yang spesifik sebagai



kondisi batas tertentu harus didefinisikan saat pembuatan geometri pada *software* Gambit. Hal tersebut sebagaimana yang telah didefinisikan pada penelitian ini dan ditampilkan pada gambar 3.5, dimana silinder bersirip yang merupakan gabungan dari beberapa luasan menjadi satu bagian silinder dan fin didefinisikan sebagai *wall*. Seperempat bagian dari objek penelitian yang telah dijelaskan dan ditampilkan pada gambar 3.3, dibatasi oleh bidang *XY* dan *XZ* didefinisikan sebagai bidang *symmetry*. Penentuan kecepatan dan hal lainnya sesuai model fisik yang akan disimulasikan ditentukan pada *software* Fluent.

3.2.3 Meshing

Langkah selanjutnya dari proses simulasi numerik adalah pembuatan *mesh*. Pada gambar 3.6 (a) ditampilkan hasil *mesh* yang dibuat lebih rapat pada daerah di sekitar silinder dan fin dengan menggunakan skema *hexahedral/map*. Skema ini menjadikan *hexahedral* sebagai komposisi utama dalam membentuk *mesh*. Bentuk *hexahedral* akan lebih mengurangi resiko kesalahan dan mengurangi jumlah elemen. *Meshing* dengan skema ini dapat dilakukan jika volume memiliki 8 titik, sehingga geometri yang lebih rumit harus dibagi menjadi beberapa bidang. Hal tersebut sebagaimana ditunjukkan pada gambar 3.6 (b). Bagian yang dekat dengan silinder bersirip dibuat volume setengah silinder yang menyelimuti objek penelitian. *Mesh* pada volume tersebut lebih rapat dibandingkan pola *mesh* volume setengah silinder berikutnya, kemudian pola *mesh* selanjutnya dibuat mengikuti bentuk saluran.

Tabel 3.2 Hubungan Kualitas *Mesh* dan Nilai *Skewness*

Nilai <i>Skewness</i>	0–0,25	0,25–0,50	0,50–0,80	0,80–0,95	0,95–0,99	0,99–1,00
Kualitas <i>Mesh</i>	<i>excellent</i>	<i>good</i>	<i>acceptable</i>	<i>poor</i>	<i>sliver</i>	<i>degenerate</i>

Pada gambar 3.6 (c) ditampilkan hasil *meshing* permukaan dari seperempat ukuran objek penelitian ini. *Meshing volume* dilakukan setelah pembuatan *mesh* permukaan dan garis. Kualitas *mesh* diperiksa dengan menggunakan *examine mesh* pada *software* Gambit. Batasan *skewness* yangizinkan ditampilkan pada tabel 3.2 (Fluent Inc., 2007), yaitu berada diantara nilai 0 – 0,80. Nilai *skewness* diantara 0,80 – 1,00 adalah kualitas *mesh* yang tidak disarankan, sehingga diperlukan perbaikan *mesh* untuk kondisi tersebut.



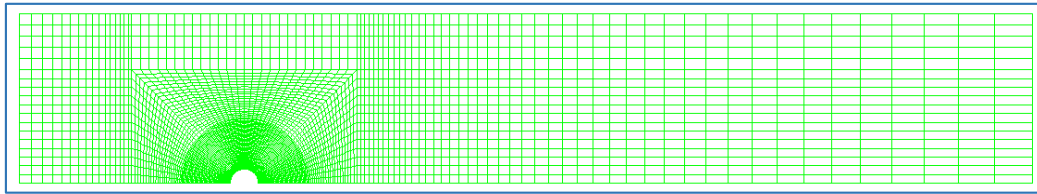
3.2.4 Grid Independensi

Studi numerik ini menggunakan *software Fluent 6.3.26* dan memerlukan keakuratan data baik pada langkah *post processing* maupun *preprocessing*. Proses *grid independensi* diperlukan untuk menentukan struktur *grid* terbaik dan efisien agar hasil pemodelan mendekati kondisi *real*.

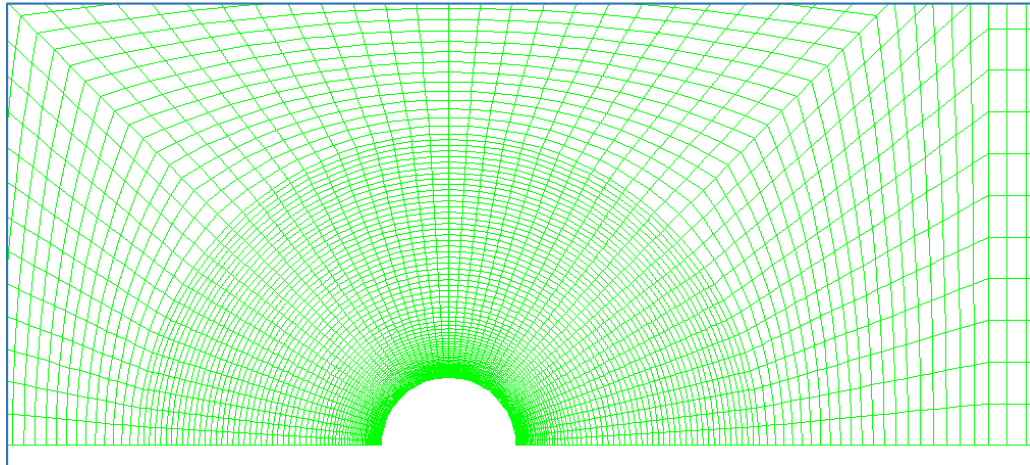
Pada tabel 3.3 ditunjukkan *meshing* model benda uji silinder sirkular tanpa fin dengan pemodelan 3D. *Meshing A* merupakan *meshing* yang paling renggang dengan jumlah *faces* 582.166, sedangkan *meshing E* adalah *meshing* yang paling rapat dengan jumlah *faces* 731.666. Pada tabel 3.2 ditampilkan bahwa *mesh A* mempunyai nilai C_D yang paling kecil yaitu 1,028 dan *mesh E* mempunyai nilai C_D yang paling besar yaitu 1,326. Setelah dilakukan validasi dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Ladjedel dkk (2011) tentang aliran yang melintasi silinder sirkular, maka *meshing* yang digunakan dalam penelitian ini adalah *meshing C* dengan *error* nilai C_D yang terkecil 1,59 %. Hal ini dilakukan agar simulasi numerik yang dilakukan dapat menghasilkan nilai yang akurat dan proses simulasi yang efektif serta efisien.

Tabel 3.3 *Grid independensi* silinder sirkular tanpa fin.

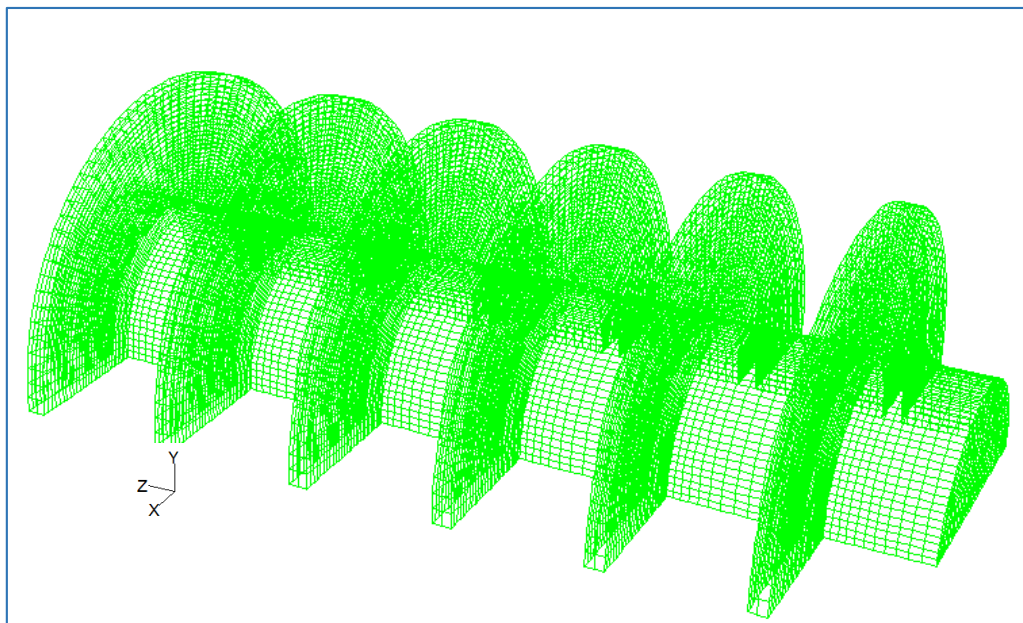
<i>Meshing</i>	<i>Faces</i>	C_D	C_D (Ladjedel dkk, 2011)	<i>Error</i>
A	582.166	1,03	1,26	18,41 %
B	612.066	1,06	1,26	15,56 %
C	671.866	1,24	1,26	1,59 %
D	701.766	1,31	1,26	3,97 %
E	731.666	1,33	1,26	5,24 %



(a)



(b)



(c)

Gambar 3.6 Hasil *meshing* silinder bersirip dengan $s = 14$ mm, (a) tampak sisi simetris 1, (b) tampak 2D simetri 1 yang diperbesar pada daerah sekitar benda uji, dan (c) tampak 3D dari seperempat benda uji



Jumlah dan rasio *node* disesuaikan dengan panjang dan bentuk garis, karena hal ini sangat berpengaruh terhadap hasil simulasi. Selain itu, jumlah dan rasio *node* dari beberapa pola yang dibuat, dipilih setelah dilakukan *grid independence* dan validasi hasil. Metode validasi yang digunakan pada penelitian ini adalah membandingkan dengan hasil eksperimen penelitian sebelumnya.

3.2.5 Processing

Sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya, hasil *meshing* diproses lebih lanjut dengan menggunakan *software* Fluent 6.3. Langkah-langkah *processing* dijelaskan sebagai berikut:

a. Models

Pada langkah ini dilakukan pemodelan aliran yang meliputi pemilihan model *solver* dan penentuan *turbulence model* yang digunakan. Simulasi numerik pada penelitian ini dilakukan dengan pendekatan 3D-*steady flow Reynolds Averaged-Navier Stokes* (RANS) dan RNG $k-\epsilon$. Kestabilan dan akurasi yang memadai disamping kebutuhan memori yang lebih terjangkau dibandingkan dengan *Reynolds-Stress Model* (RSM) menjadi alasan pemilihan model ini.

b. Material

Properties material yang dimasukkan adalah *properties* udara yang disesuaikan dengan kondisi udara di sekitar peralatan eksperimen yang akan dijadikan hasil pembandingan. *Properties* udara yang digunakan pada kondisi STP dengan temperatur 28 °C adalah, densitas (ρ) = 1,17 kg/m³ dan viskositas (μ) = 1,85 x 10⁻⁵ N.s/m².

c. Operating Condition

Kondisi STP (*Standard Temperature and Pressure*) diatur sebagai kondisi operasi simulasi numerik yaitu 1 atm atau 101.325 Pascal.

d. Boundary Condition

Boundary Condition adalah penentuan parameter-parameter dan batasan yang terjadi pada aliran yang melewati benda uji berupa *inlet*, *outlet*, dan kondisi dinding sebagaimana ditunjukkan pada gambar 3.5. Kondisi *inlet*



aliran udara, *velocity inlet* 16 m/s atau pada $Re_d = 2,5 \times 10^4$ yang didasarkan pada diameter silinder. *Velocity inlet* digunakan sebagai tipe *boundary* karena aliran fluida diasumsikan masih berada pada kondisi aliran *incompressible* dengan kecepatan *inlet* yang telah ditentukan.

Simulasi pada penelitian ini menggunakan *turbulence model*, maka pengaturan pada *inlet* digunakan persamaan-persamaan dan ketentuan-ketentuan yang telah disebutkan pada sub-bab 2.5. Perhitungan dilakukan berdasarkan data fisik *wind tunnel sub sonic* di Laboratorium Teknik Mesin ITS. *Length scale* 21 mm sebagai hasil perhitungan dari persamaan 2.17 dan 2.18 yang digunakan untuk memperkirakan *turbulence length scale* pada sisi *inlet*. Intensitas turbulensi 1,56 % (Bantacut dan Widodo, 2014) diterapkan pada kondisi batas *inlet* domain simulasi numerik sebagai karakteristik *wind tunnel* yang digunakan dalam eksperimen. Panjang saluran *downstream* adalah $28d$, sehingga diasumsikan aliran berkembang penuh (*fully developed*) saat keluar dari domain saluran yang dibuat. Pada kondisi tersebut dapat digunakan tipe *boundary out flow* sebagai *boundary outlet*.

e. *Solution*

Solusi pada penelitian ini adalah menggunakan *second order* untuk *pressure*, *momentum turbulent kinetic energy*, dan *turbulent dissipation rate*.

f. *Initialize*

Proses ini merupakan langkah perhitungan awal untuk memudahkan dalam mendapatkan hasil yang konvergen pada tahap iterasi. *Initialize* dihitung dari *velocity inlet*.

g. *Monitor Residual*

Langkah ini adalah bagian dari tahapan penyelesaian masalah berupa proses iterasi sampai mencapai kriteria konvergensi yang diinginkan. Kriteria *default software* Fluent 6.3 untuk semua residual adalah ketika nilainya sama atau lebih kecil dari 10^{-3} , kecuali untuk energi sebesar 10^{-6} . Pada penelitian ini nilai residual disesuaikan dengan kondisi model yang diamati saat proses iterasi, hingga didapatkan nilai residual terkecil yang dapat dicapai. Hal ini



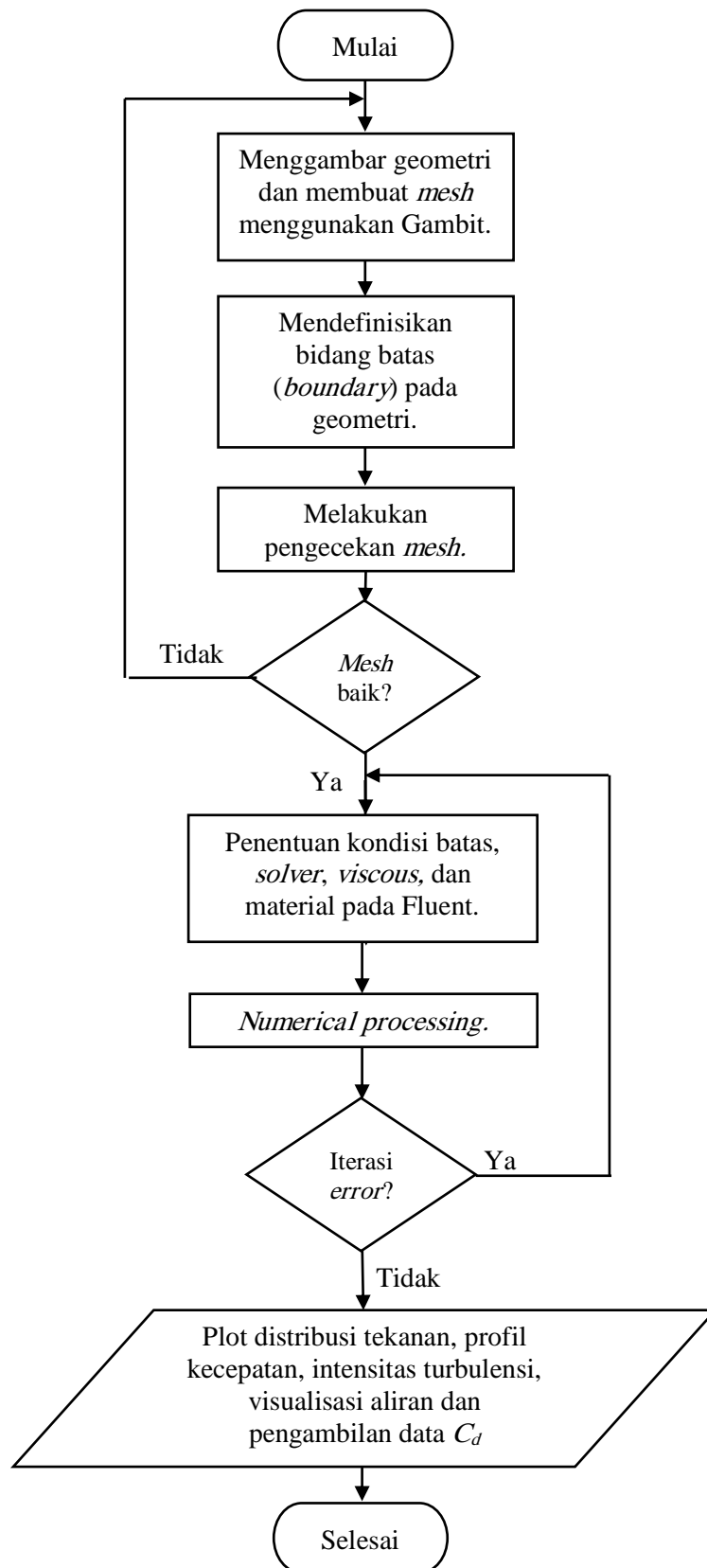
disebabkan pada suatu kondisi tertentu, residual dari salah satu atau beberapa parameter yang diamati relatif tidak berubah ketika iterasi terus dilanjutkan atau membentuk grafik asimtot. Pada kondisi tersebut solusi dari simulasi yang dilakukan juga dapat dinyatakan konvergen (Fluent Inc., 2006).

h. Iterasi

Proses iterasi merupakan langkah kelanjutan dari *monitor residual* dimana *software* Fluent mulai melakukan langkah perhitungan secara numerik. Pada tahap ini dilakukan iterasi sampai kriteria konvergensi tercapai atau didapatkan nilai terkecil yang dapat diperoleh pada simulasi yang dilakukan, selanjutnya hasil *running* diolah pada *post-processing*. Namun jika tidak didapatkan hasil yang konvergen, maka tahapan akan kembali ke tahapan awal dari *processing* untuk memeriksa kembali parameter-parameter yang dimasukkan selama proses tersebut. Perbaikan *mesh* menjadi alternatif berikutnya ketika pada proses iterasi belum diperoleh hasil yang konvergen.

3.2.6 Post-processing

Post-processing adalah proses menampilkan hasil serta analisa terhadap hasil yang telah diperoleh berupa data kuantitatif dan data kualitatif. Data kuantitatif berupa koefisien *drag*, distribusi koefisien tekanan di permukaan silinder dan permukaan fin, profil kecepatan dan intensitas turbulensi di belakang model benda uji pada jarak $4d$ dari sumbu silinder. Sedangkan data kualitatif berupa visualisasi aliran dengan menampilkan *grid display*, *pathlines*, dan *contour plot* dari silinder sirkular dan silinder bersirip dengan variasi jarak antar fin.



Gambar 3.7 Diagram alir proses pemodelan dengan Fluent 6.3



Pada gambar 3.7 ditampilkan diagram alir proses simulasi numerik yang akan dilakukan pada penelitian ini. Pada diagram ditunjukkan urutan langkah-langkah dari seluruh proses simulasi numerik yang telah dijelaskan sebelumnya. Ketika terjadi kesalahan dalam proses iterasi, berupa iterasi yang tidak konvergen, maka dilakukan pengecekan ulang terhadap pengaturan kondisi batas, kriteria konvergensi dan *viscous model* yang digunakan.

3.3 Eksperimen dengan Terowongan Angin (*Wind Tunnel*)

3.3.1 *Open Circuit Sub Sonic Wind Tunnel*

Eksperimen dilakukan menggunakan terowongan angin jenis *open circuit wind tunnel*, sebagaimana ditampilkan pada gambar 3.8. Udara yang dialirkan ke dalam *wind tunnel* langsung lepas bebas ke udara luar setelah melalui *test section*.



Gambar 3.8 *Open circuit sub sonic wind tunnel*

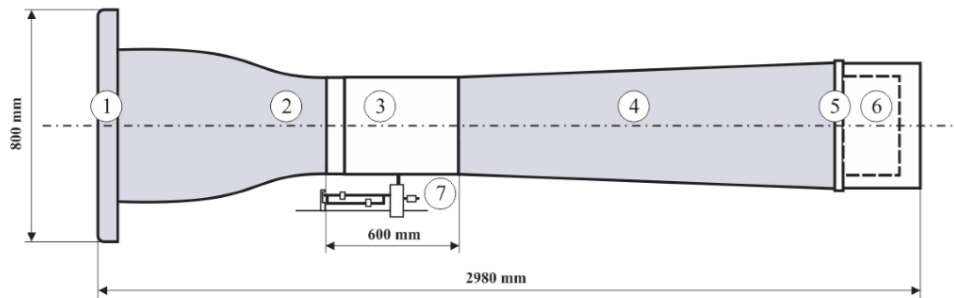
Spesifikasi terowongan angin yang ditunjukkan pada gambar 3.8 dengan bentuk *octagonal* dijelaskan sebagai berikut:

Jenis	: <i>Open circuit sub sonic wind tunnel</i>
Dimensi	: Panjang total 2.980 mm, dengan rincian <i>test section</i> , Panjang : 600 mm Lebar : 300 mm Tinggi : 300 mm



Kecepatan aliran udara maksimum : 20 m/s

Catu Daya : 240 volt / *single phase* /50 Hz–1,5 KW



Keterangan:

1. *Settling chamber*
2. *Contraction cone*
3. *Test section*

4. *Difusser*

5. *Exhaust fan*

6. *Motor penggerak*

7. *Ex External force balance*

Gambar 3.9 Skema alat penelitian *sub sonic wind tunnel*

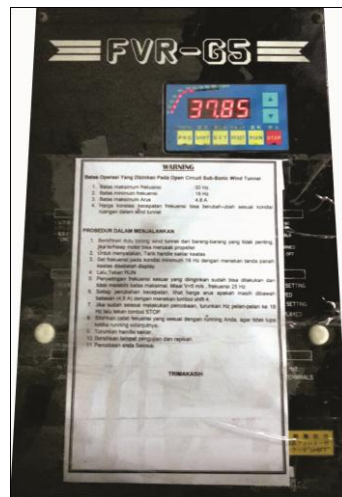
Pada gambar 3.9 di atas ditampilkan bagian-bagian utama terowongan angin *subsonic* yang digunakan. Udara yang masuk menuju *test section* telah diseragamkan melalui *honeycomb* yang berada pada *settling chamber* sehingga dihasilkan aliran udara yang linear dan mengurangi turbulensi aliran. Aliran udara selanjutnya melalui *contraction cone* yang akan meningkatkan kecepatan udara dan menurunkan tekanan, sehingga dihasilkan kecepatan yang maksimal pada seksi uji. *Exhaust fan* yang digerakkan oleh motor penggerak memberikan gaya hisapan sehingga terjadi aliran udara pada *wind tunnel* yang keluar melalui *difusser*.

Pada gambar 3.10 ditampilkan gambar Inverter FVR-G5, yaitu alat yang berfungsi mengatur frekuensi putaran motor penggerak. Frekuensi ditetapkan setelah disesuaikan dengan hasil pembacaan *total pressure tube* yang dipasang pada saluran masuk *test section* untuk mendapatkan kecepatan aliran udara yang sesuai dengan bilangan *Re* yang diinginkan. Spesifikasi Inverter FVR-G5 yang digunakan pada penelitian ini adalah:

Batas maksimum frekuensi : 50 Hz

Batas minimum frekuensi : 18 Hz

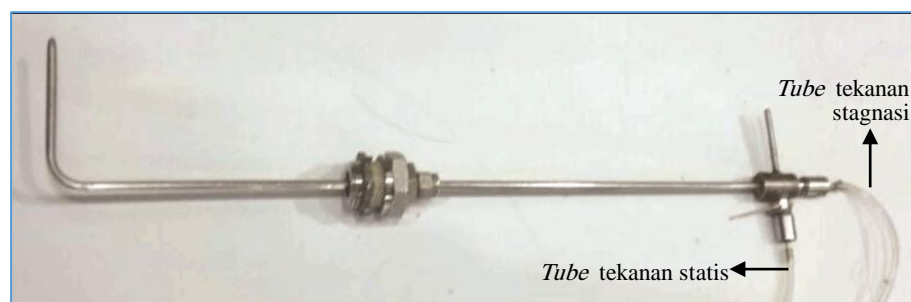
Batas maksimum arus : 4,8 A



Gambar 3.10 Inverter FVR-G5, alat pengatur frekuensi putaran motor penggerak

3.3.2 Setup Alat dan Benda Uji

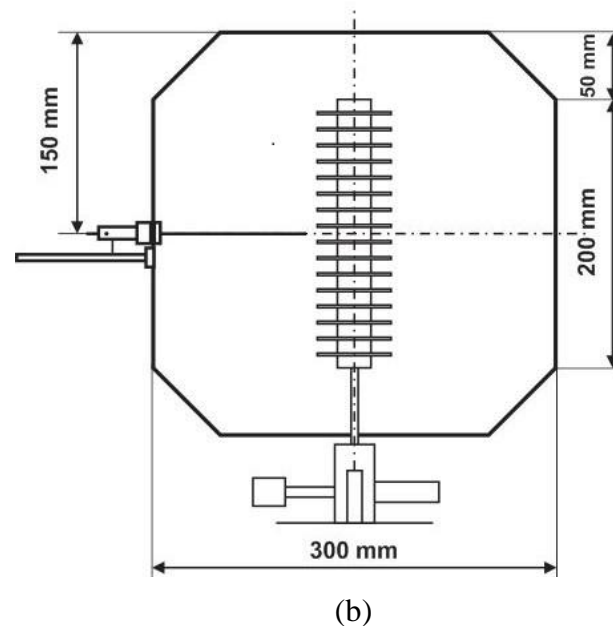
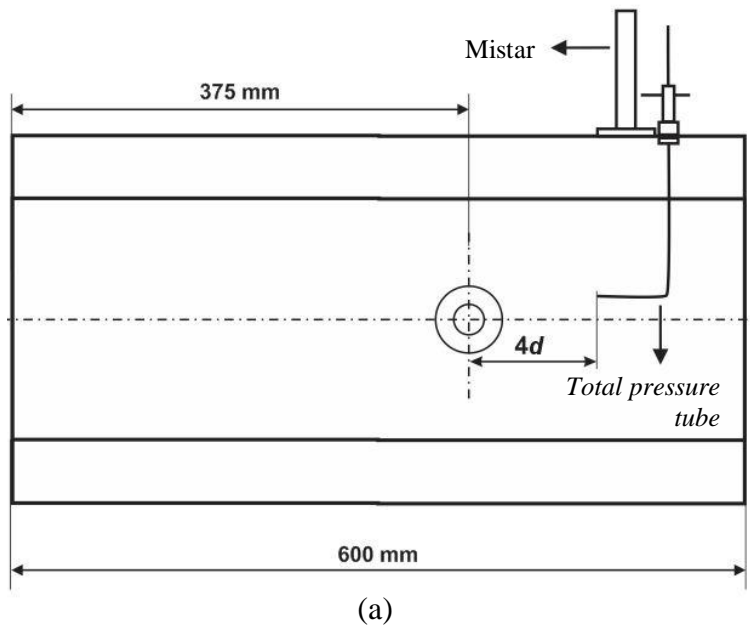
Pada penelitian ini digunakan *total pressure tube* sebagaimana ditampilkan pada gambar 3.11. *Total pressure tube* digunakan untuk mengukur tekanan stagnasi pada setiap titik di depan dan belakang benda uji sehingga diperoleh distribusi kecepatan di daerah *downstream*. *Total pressure tube* yang digunakan memiliki diameter luar sebesar 0,7 mm yang dipasang pada dinding samping *test section* bersama mistar.

Gambar 3.11 *Total pressure tube*

Pada *test section* ditempatkan benda uji, *external force balance*, *wall pressure tap*, *total pressure tube* dan mistar sebagaimana ditampilkan pada gambar 3.12. Gaya drag (F_D) yang terjadi pada benda uji dapat diukur secara langsung dengan menggunakan *external force balance*. *Total pressure tube* dipasang sejajar dengan *midspan* benda uji, yaitu pada jarak $4d$ dari *centerline* silinder dan 150 mm dari



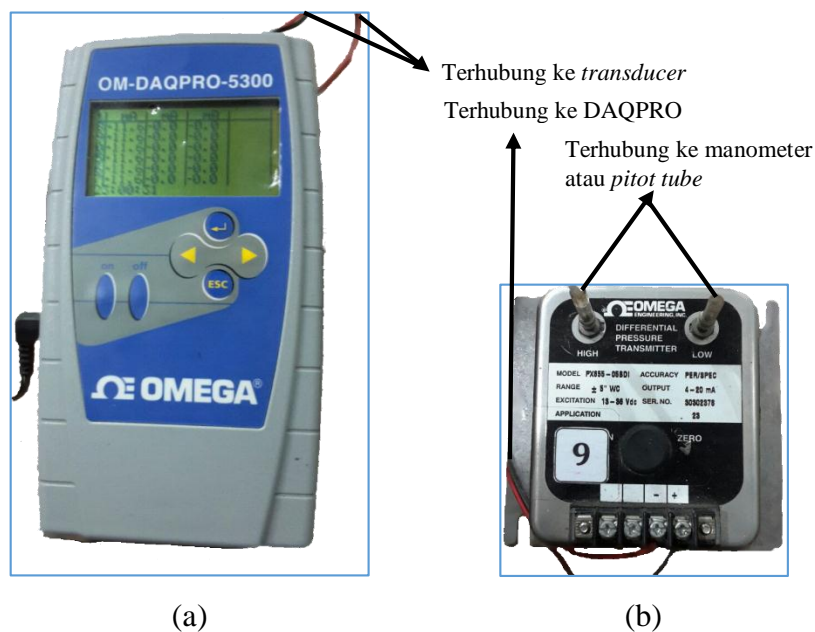
dinding atas *wind tunnel*. Jarak $4d$ ditetapkan sebagai daerah pengambilan data profil kecepatan karena pada jarak tersebut pengaruh vorteks yang terbentuk dari separasi aliran di permukaan silinder sudah tidak begitu signifikan. Sebagaimana Khashehchi dkk (2014) dan Widodo dkk (2009) telah melakukan pengamatan profil kecepatan di belakang silinder sirkular pada jarak $4d$ dari *centerline* silinder.



Gambar 3.12 *Test section* dan benda uji pada *wind tunnel*, (a) tampak atas dan (b) tampak depan



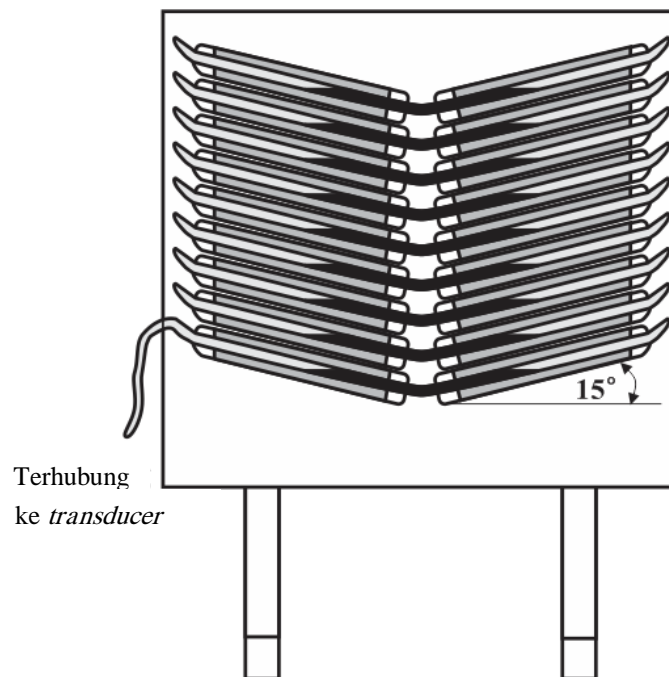
Pengaturan pergeseran titik pengukuran kecepatan di depan dan belakang benda uji dilakukan dengan menggunakan mistar. Pembacaan terkecil mistar yang digunakan adalah 1 mm. Pengukuran dilakukan dengan cara menghubungkan *total pressure tube* dengan *transducer* tekanan. *Transducer* pada penelitian ini adalah alat yang mengubah tekanan menjadi sinyal listrik, sehingga sebelum digunakan untuk pengambilan data, *transducer* dikalibrasi terlebih dahulu dengan skala pembacaan tekanan pada *inclined manometer*.



Gambar 3.13 (a) OM-DAQPRO-5300 alat pembaca sinyal yang dihasilkan *transducer*, (b) *Differential pressure transmitter*

Transducer yang digunakan yaitu *differential pressure transmitter* dan sebagai data akuisisi adalah OM-DAQPRO-5300 sebagaimana ditunjukkan pada gambar 3.13. Spesifikasi *transducer* yang digunakan dijelaskan sebagai berikut:

Model : PX655-05BDI
Range : $\pm 3''$ WC
Excitation : 13 – 36 Vdc
Output : 4 – 20 mA

Gambar 3.14 *Inclined manometer*.

Pada gambar 3.14 ditampilkan *inclined manometer* yang digunakan pada penelitian ini. Alat tersebut berfungsi sebagai alat ukur tekanan yang menjadi acuan kalibrasi *transducer*. *Inclined manometer* dengan sudut kemiringan 15° untuk mempermudah pembacaan Δh . Spesifikasi manometer yang digunakan adalah sebagai berikut:

Sudut inklinasi	: 15°
Skala maksimum	: 150 mm
Skala minimum	: 1 mm
Fluida pengisi manometer	: <i>Red Oil</i> (SG = 0,817)

3.3.3 Parameter Penelitian

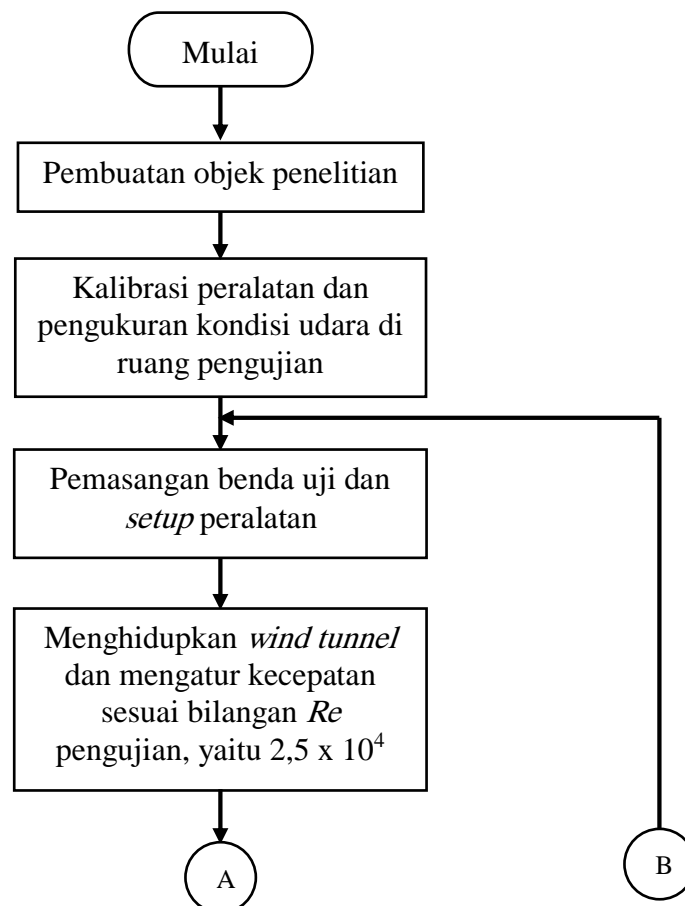
Untuk mengetahui karakteristik dari suatu aliran, diperlukan parameter-parameter yang dapat mempengaruhi. Parameter-parameter yang digunakan dalam penelitian ini meliputi gaya *drag* (F_D), massa jenis fluida (ρ), viskositas fluida (μ), kecepatan aliran *freestream* (U), jarak antar fin (s), panjang fin (h), tebal fin (t), dan diameter silinder (d). Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengamati pengaruh jumlah fin terhadap karakteristik *drag* dari masing-masing variasi yang telah

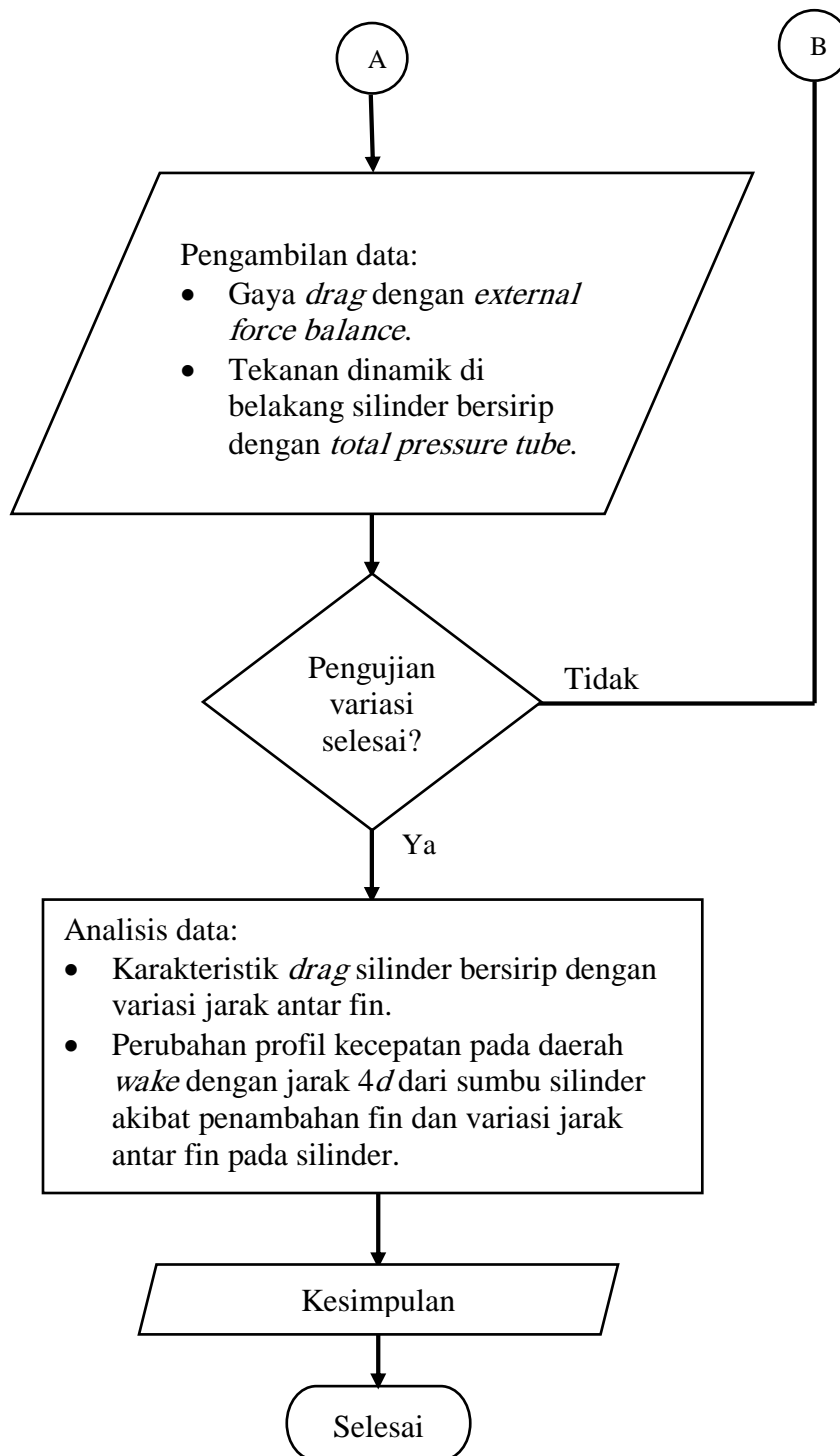


ditetapkan dengan memperoleh koefisien *drag* (C_D) dan fenomena aliran di daerah *wake*. Parameter-parameter tersebut diperoleh baik dengan pengukuran langsung maupun tidak langsung sebagaimana yang telah dijelaskan sebelumnya. Properti udara yang digunakan untuk menentukan bilangan Re diperoleh dengan pengukuran temperatur di ruangan tempat eksperimen menggunakan termometer.

3.3.4 Prosedur Pengambilan Data

Prosedur pengambilan data dengan menggunakan terowongan angin pada penelitian ini ditampilkan dalam diagram alir berikut (gambar 3.15).



Gambar 3.15 Diagram alir proses eksperimen dengan *sub sonic wind tunnel*

Pada gambar 3.15 ditampilkan diagram alir proses pengambilan data pengujian karakteristik *drag* dari silinder bersirip pada penelitian ini dengan



menggunakan *open circuit sub sonic wind tunnel*. Berikut penjelasan proses utama pada diagram alir tersebut:

1. Pemasangan benda uji pada *wind tunnel*.
2. *Setup* alat ukur penelitian.
3. Kalibrasi *transducer* terhadap *inclined manometer*, diantaranya kalibrasi tekanan statik dan tekanan dinamik.
4. Menentukan frekuensi inverter FVR untuk kecepatan 16 m/s.
5. Pengukuran kecepatan.

Pengukuran kecepatan di bagian *upstream* dan *downstream* dilakukan dengan menghubungkan *total pressure tube* ke *transducer*. *Tube* tekanan statik dan stagnasi masing-masing dihubungkan ke posisi *low* dan *high* pada *transducer*. Pengukuran dilakukan pada jarak $4d$ pada *downstream*. Pada daerah tersebut diambil 56 data ke arah horizontal dengan jarak semakin renggang mendekati *freestream*. Data yang diperoleh adalah data tekanan dinamik, sehingga akan didapatkan profil kecepatan pada masing-masing *section*.

6. Pengukuran gaya *drag* menggunakan *external force balance*.
7. Mengulangi prosedur 1-4 untuk silinder sirkular dan silinder bersirip dengan variasi jarak antar fin 10 mm, 14 mm, dan 18 mm.

Data yang diperoleh dari hasil pengukuran adalah data kuantitatif profil kecepatan di daerah *wake* silinder bersirip dan gaya *drag* pada silinder bersirip. Karakteristik *drag* silinder bersirip yang akan ditampilkan dalam besaran *nondimensional*, C_D yang ditentukan dari gaya *drag* hasil pengukuran langsung dengan menggunakan *external force balance*.



3.4 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Mekanika Fluida dan Laboratorium Komputer Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Perkiraan waktu dan kegiatan penelitian dijelaskan pada tabel 3.4. Kegiatan diawali dengan studi literatur yang relevan dengan kasus yang akan diamati kemudian dilanjutkan dengan penyusunan proposal dan hal-hal yang berkaitan dengan kegiatan penelitian yang akan dilakukan. Kegiatan dan jadwal pelaksanaan pada penelitian ini diuraikan sebagai berikut,

Tabel 3.4 Jadwal Kegiatan Penelitian

Kegiatan	Bulan					
	I	II	III	IV	V	VI
<i>Review Jurnal</i>						
Menyusun porosal						
Seminar Proposal						
Membuat objek penelitian di Gambit						
Membuat objek penelitian di Lab.Mekanika Fluida						
<i>Running fluent</i>						
Pengujian pada <i>wind tunnel</i>						
Analisa data dari Fluent dan eksperimen						
Ujian Tesis						



BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil eksperimen pada *wind tunnel* dan simulasi numerik menggunakan *software* Fluent 6.3 dibahas pada bab ini. Hasil pengukuran yang diperoleh secara eksperimen adalah data kuantitatif berupa profil kecepatan di daerah *wake* pada jarak $4d$ dari sumbu silinder, gaya *drag* pada silinder sirkular dan silinder bersirip. Karakteristik *drag* ditampilkan dalam besaran *nondimensional*, C_D yang ditentukan dari gaya *drag* hasil pengukuran langsung dengan menggunakan *external force balance*. Hasil analisa kemudian dibandingkan dengan hasil simulasi numerik.

Post-processing dari proses simulasi numerik adalah data kuantitatif dan data kualitatif. Profil kecepatan dan intensitas turbulensi di belakang silinder, distribusi koefisien tekanan di permukaan silinder dan permukaan fin, dan koefisien *drag* merupakan data kuantitatif yang akan ditampilkan dan dianalisa. Sedangkan data kualitatif berupa visualisasi aliran dengan menampilkan *pathlines*, *contour plot*, dan *vector plot*.

Jarak antar fin pada *finned cylinder* akan memberikan pengaruh pada koefisien perpindahan panas di permukaan fin. Pada kecepatan udara yang sama, jarak antar fin yang lebih renggang akan menghasilkan koefisien perpindahan panas yang lebih besar, sebagaimana penelitian yang telah dilakukan oleh Yoshida dkk (2006). Pola aliran di permukaan fin dari hasil simulasi numerik dengan variasi jarak antar fin 10 mm, 14 mm, dan 18 mm pada penelitian ini akan ditampilkan dan dibandingkan dengan pola aliran di permukaan fin hasil eksperimen yang dilakukan oleh Yoshida dkk (2006). Visualisasi tersebut digunakan untuk menganalisa pola aliran yang terjadi di sekitar fin dan silinder

Pembahasan pada bab ini dimulai dengan hasil dan analisa profil kecepatan, baik dari hasil eksperimen maupun dari hasil numerik. Intensitas turbulensi di belakang silinder yang merupakan hasil simulasi numerik diuraikan pada bagian berikutnya. Sesudah itu dilanjutkan pembahasan mengenai distribusi koefisien tekanan (C_P) pada permukaan silinder dan permukaan fin, dimana distribusi C_P ini diperoleh secara numerik. Pembahasan kemudian dilanjutkan tentang *drag* total



yang terjadi pada silinder sirkular dan silinder bersirip, baik dari hasil eksperimen maupun numerik. Data kualitatif dari hasil simulasi numerik ditampilkan di akhir pembahasan.

4.1. Profil Kecepatan di Daerah *Wake*

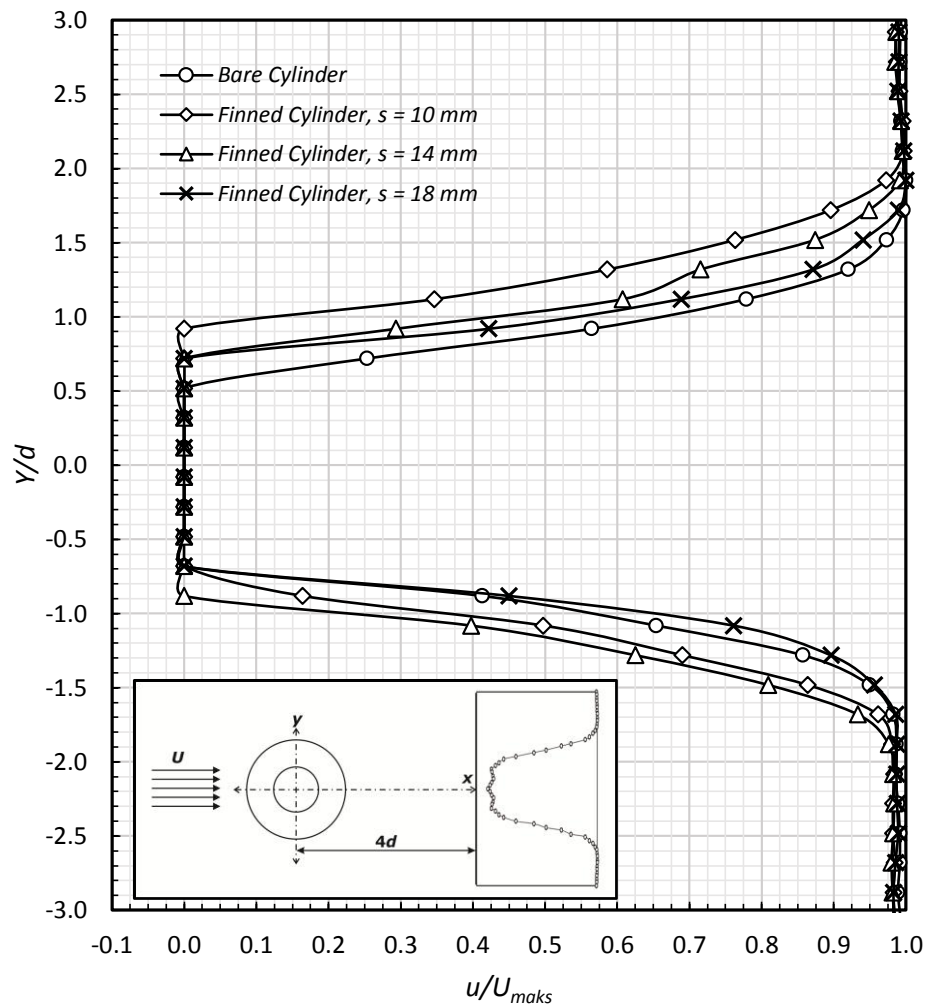
4.1.1. Profil Kecepatan Hasil Eksperimen

Profil kecepatan yang terbentuk di belakang suatu benda yang diamati dapat menjadi data awal untuk memperkirakan besarnya *drag force* yang dihasilkan suatu benda dibandingkan benda yang lain, sebagaimana ditampilkan pada gambar 4.1. Profil kecepatan di daerah *wake* hasil eksperimen pada $Re = 2,5 \times 10^4$ (berdasarkan diameter silinder dan kecepatan udara *inlet*) menggunakan *total pressure tube* yang ditempatkan pada jarak 100 mm atau $4d$ dari *centerline* silinder sirkular. Profil kecepatan yang ditampilkan adalah profil kecepatan di belakang silinder sirkular dan silinder bersirip dengan jarak antar fin (s) 10 mm, 14 mm, dan 18 mm. Daerah *wake* yang terbentuk di belakang silinder sirkular lebih kecil dibandingkan daerah *wake* yang terbentuk di belakang semua silinder bersirip. Hal ini menunjukkan bahwa silinder sirkular menghasilkan defisit momentum yang lebih kecil dibandingkan dengan defisit momentum silinder bersirip.

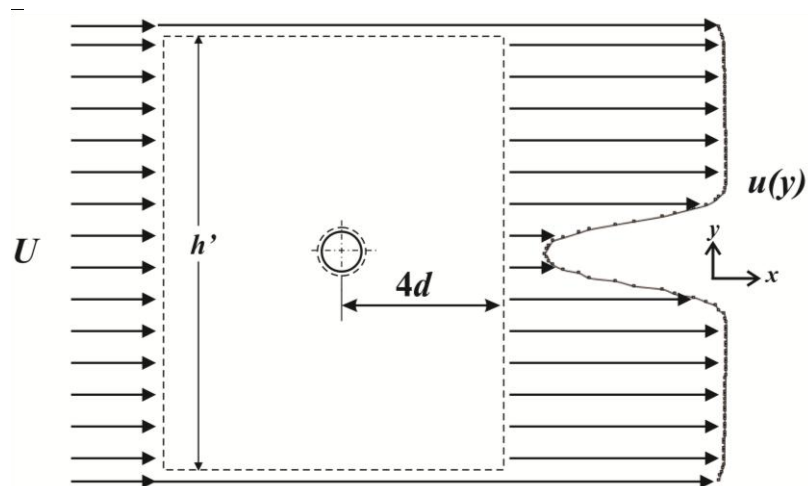
Hubungan antara profil kecepatan yang terbentuk di belakang silinder dan gaya *drag* dapat dijelaskan dengan persamaan momentum dari gambar 4.2 yang dinyatakan sebagai berikut:

$$F_x = (\rho U^2 b h') - \left(\rho b \sum_{wake} u^2 \delta y \right) \quad (4.1)$$

Massa jenis fluida pada persamaan 4.1 disimbolkan dengan ρ , sedangkan U dan bh' masing-masing adalah kecepatan udara *inlet* dan luas frontal *inlet*. Kecepatan sepanjang garis sumbu y dengan jarak antar titik 5 mm pada daerah $4d$ dari garis pusat silinder disimbolkan dengan u .



Gambar 4.1 Profil kecepatan pada daerah *wake* hasil eksperimen (jarak $x = 4d$ dari *centerline* silinder sirkular)



Gambar 4.2 Volume atur aliran melintasi silinder sirkular

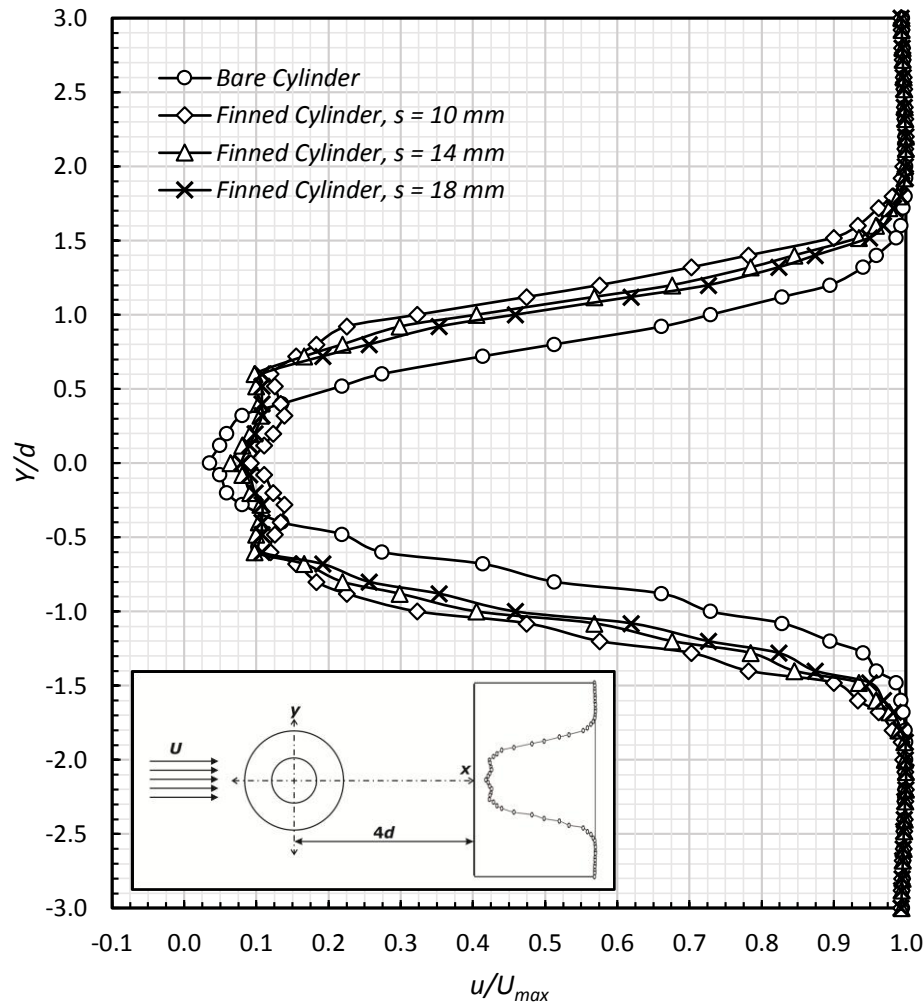


Pada gambar 4.2 tampak bahwa luas daerah *inlet* sama dengan luas daerah *outlet*, aliran yang diamati adalah *incompressible flow*, maka dari persamaan 4.1 di atas dapat dinyatakan bahwa faktor yang mempengaruhi perubahan gaya *drag* adalah profil kecepatan di daerah *wake*. Semakin besar defisit momentum, maka gaya *drag* yang dihasilkan juga akan lebih besar dibandingkan dengan gaya *drag* yang dihasilkan oleh benda dengan defisit momentum lebih kecil di daerah *wake*. Sehingga, pada kasus yang diamati gaya *drag* yang dihasilkan oleh silinder sirkular lebih kecil dibandingkan gaya *drag* pada silinder bersirip.

4.1.2. Profil Kecepatan Hasil Simulasi Numerik

Profil kecepatan di belakang silinder sirkular dan silinder bersirip dengan jarak antar fin 10 mm, 14 mm, dan 18 mm hasil simulasi numerik ditampilkan pada gambar 4.3. Trend grafik profil kecepatan di belakang silinder sirkular lebih sempit dibandingkan profil kecepatan di belakang silinder bersirip lainnya. Profil kecepatan semakin besar secara bertingkat dimulai dari profil kecepatan di belakang silinder bersirip dengan $s = 18$ mm, $s = 14$ mm, dan $s = 10$ mm, hal ini identik dengan hasil eksperimen pengukuran profil kecepatan pada gambar 4.1.

Kecepatan aliran di belakang silinder sirkular pada daerah $x/d = 4$ saat $y/d = 1.5$, mulai mengalami penurunan dari kecepatan *freestream* sebagai pengaruh dari separasi aliran yang terbentuk di permukaan silinder. Kecepatan terus berkurang hingga $y/d = 0.5$ atau tepat berada di belakang silinder sirkular, dimana pengaruh vorteks aliran semakin besar (sebagaimana akan ditampilkan pada pembahasan *contour* kecepatan) sehingga kecepatan udara turun dengan cukup signifikan hingga bidang simetris.



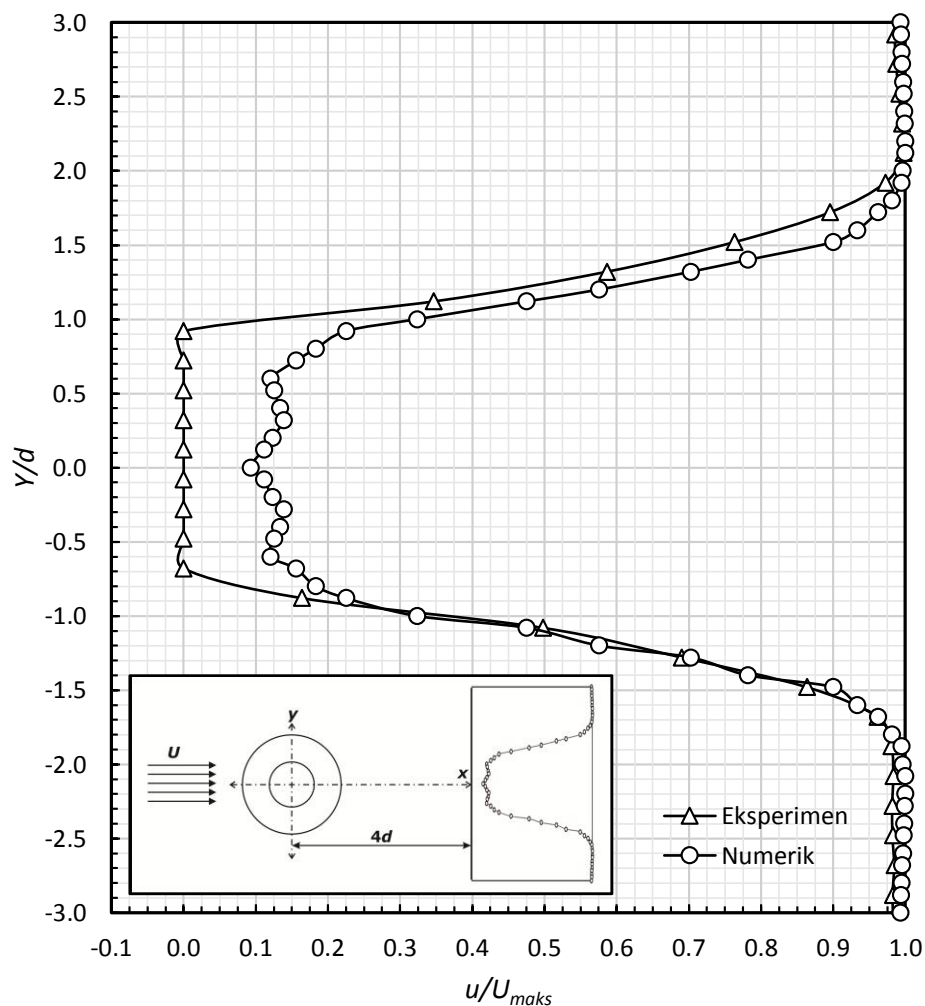
Gambar 4.3 Profil kecepatan pada daerah *wake* hasil simulasi numerik (jarak $x = 4d$ dari *centerline* silinder)

Hal yang berbeda terjadi pada profil kecepatan di belakang silinder bersirip, penurunan kecepatan mulai terjadi antara $y/d = 1.7$ sampai $y/d = 1.8$. Pada silinder bersirip dengan $s = 10$ mm kecepatan turun signifikan pada $y/d = 0.9$ hingga $y/d = 0.6$, kemudian kembali meningkat hingga titik $y/d = 0.3$, selanjutnya kembali turun hingga titik simetris. Trend grafik kecepatan seperti ini terjadi karena celah antar fin menjadikan kecepatan aliran udara sedikit meningkat yang dapat diamati pada $x/d = 4$ saat $y/d = 0.6$ sampai $y/d = 0.3$. Visualisasi data ini serta distribusi tekanan di permukaan silinder dan fin yang akan diuraikan pada pembahasan selanjutnya dapat menjadi gambaran awal untuk mempertegas hasil data kualitatif karakteristik *drag* total dari silinder sirkular dan silinder bersirip.



4.1.3. Perbandingan Profil Kecepatan Hasil Eksperimen dan Numerik

Perbandingan profil kecepatan hasil pengukuran eksperimen dan simulasi numerik pada penelitian ini ditampilkan pada gambar 4.4. Pada gambar tersebut ditampilkan profil kecepatan pada jarak $4d$ di belakang silinder bersirip dengan *fin pitch* 10 mm hasil simulasi numerik dan hasil eksperimen. Hasil eksperimen ditunjukkan dengan *marker* berbentuk segitiga sedangkan simulasi numerik dengan *marker* berbentuk lingkaran.



Gambar 4.4 Profil kecepatan silinder bersirip $s = 10$ mm pada daerah *wake* hasil eksperimen dan simulasi numerik (jarak $x = 4d$ dari *centerline* silinder sirkular)

Pada gambar 4.4 dapat dilihat bahwa terjadi kesesuaian trend dari grafik hasil simulasi numerik dan hasil pengukuran eksperimen. Hal ini menunjukkan akurasi hasil simulasi numerik yang dilakukan menggunakan *software* Fluent 6.3 konsisten



terhadap hasil eksperimen. Namun pada hasil eksperimen saat $y/d = 0.92$ sampai $y/d = -0.68$, $u/U_{max} = 0$ sehingga tidak terbentuk pola sebagaimana hasil simulasi numerik (demikian pula hasil yang ditampilkan pada gambar 4.1). Hal ini disebabkan oleh pembacaan *total pressure tube* pada daerah tersebut menghasilkan tekanan negatif sehingga perhitungan kecepatan tidak dapat dilakukan.

4.2. Intensitas Turbulensi (*IT*) Hasil Simulasi Numerik

Intensitas turbulensi didefinisikan sebagai akar dari rata-rata kuadrat kecepatan fluktuatif dibagi dengan kecepatan rata-rata menurut waktu, atau dapat ditulis:

$$IT = \frac{\sqrt{(u')^2}}{\bar{u}} \times 100 \% \quad (4.2)$$

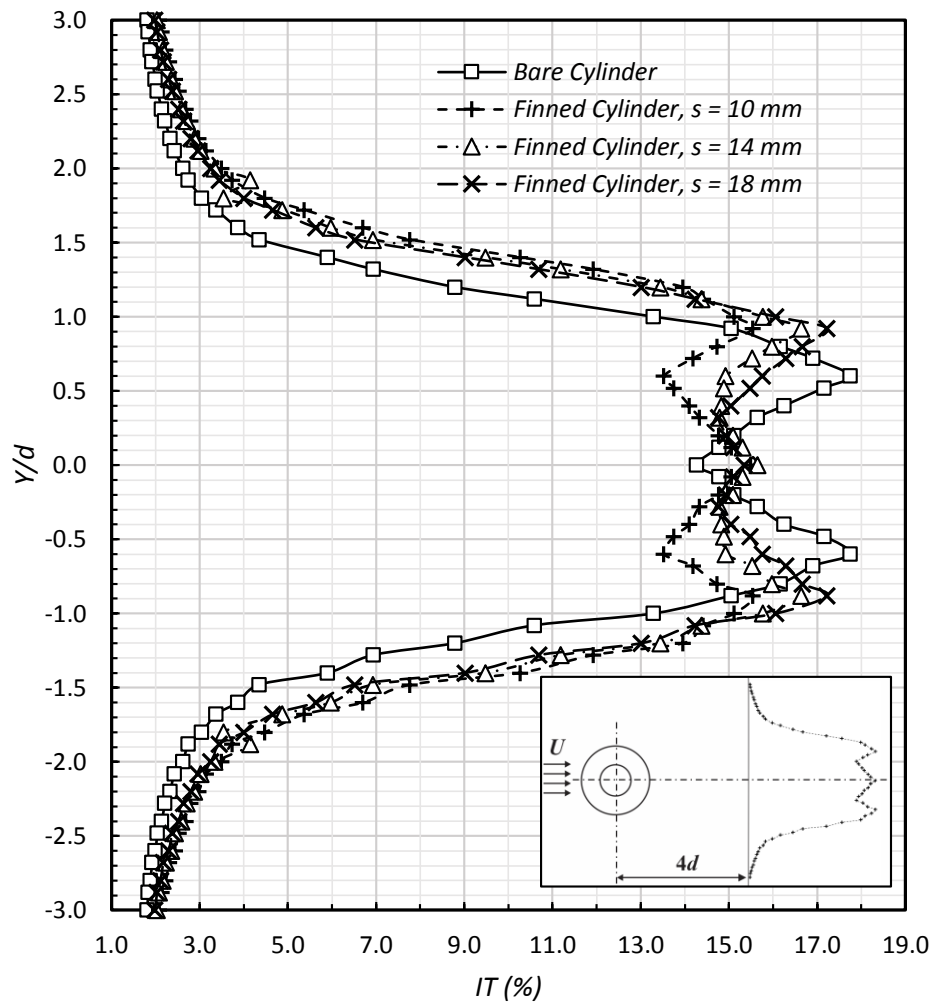
dimana,

IT = Intensitas turbulensi

u' = Fluktuasi kecepatan (m/s)

\bar{u} = Kecepatan rata-rata (m/s)

Berdasarkan persamaan 4.2, nilai intensitas turbulensi akan semakin besar dengan peningkatan fluktuasi kecepatan atau penurunan kecepatan rata-rata pada suatu titik tertentu. Pada gambar 4.5 ditampilkan intensitas turbulensi hasil simulasi numerik di belakang masing-masing model benda uji baik silinder sirkular dan silinder bersirip. Intensitas turbulen terbesar terjadi pada silinder sirkular dengan $y/d = 0,6$ yaitu sebesar 17,8 %. Silinder bersirip dengan *fin pitch* 18 mm, 14 mm, dan 10 mm intensitas turbulen tertinggi terjadi pada $y/d = 0,92$, masing-masing 17,2 %, 16,6 %, dan 15,5 %.



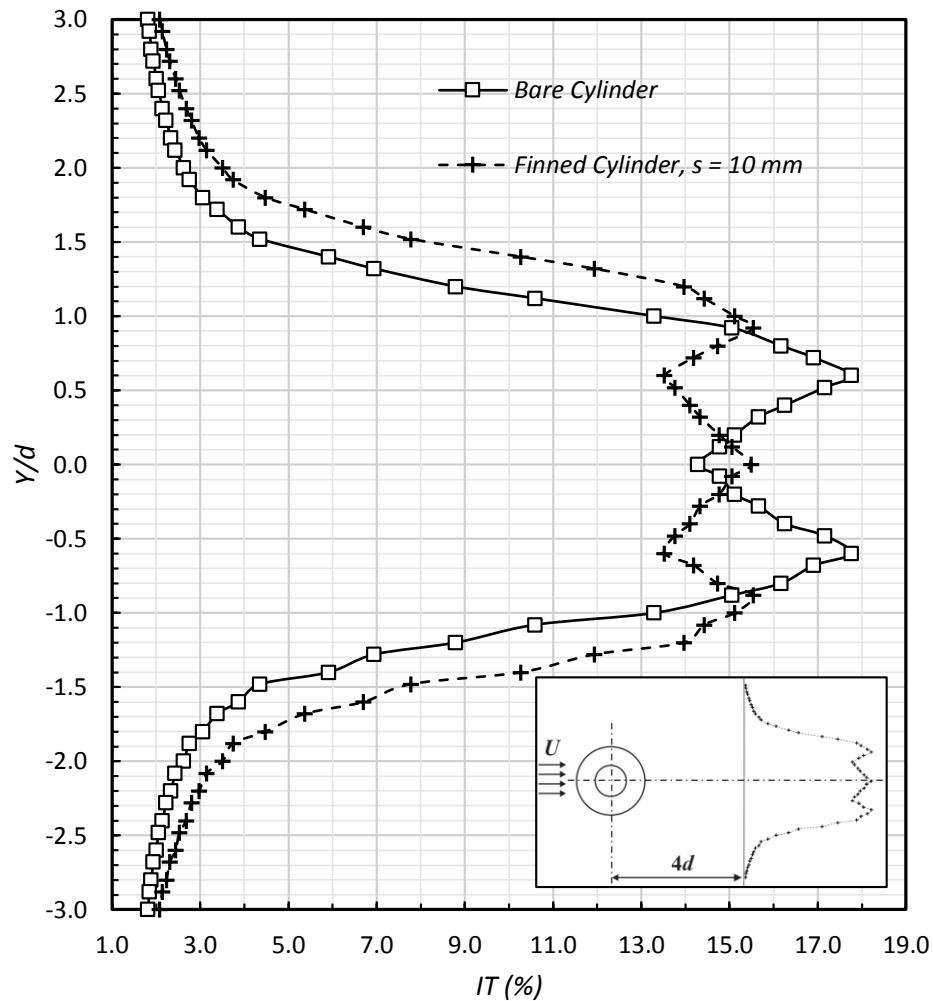
Gambar 4.5 Intensitas turbulensi (IT) pada daerah *wake* (jarak $x = 4d$ dari *centerline* silinder sirkular) hasil simulasi numerik.

Tren grafik intensitas turbulensi pada daerah $x/d = 4$, antara silinder sirkular dan silinder bersirip terdapat perbedaan. Intensitas turbulen di belakang silinder sirkular membentuk dua bukit gelombang, sedangkan intensitas turbulen di belakang silinder bersirip membentuk tiga bukit gelombang. Perbedaan tren grafik intensitas turbulensi di belakang masing-masing silinder bersirip hanya terjadi pada nilai maksimum dan nilai intensitas turbulen pada lembah-lembah grafik yang membentuk gelombang.

Pada gambar 4.6 ditampilkan Intensitas turbulensi (IT) pada daerah *wake* silinder sirkular dan silinder bersirip dengan *fin pitch* 10 mm. Nilai maksimum intensitas turbulen pada silinder sirkular dan silinder bersirip merupakan batas dari



sparation line. Berdasarkan hal tersebut fluktuasi kecepatan terbesar terjadi pada *sparation line*.



Gambar 4.6 Intensitas turbulensi (IT) pada daerah *wake* (jarak $x = 4d$ dari *centerline* silinder sirkular) hasil simulasi numerik, silinder sirkular dan silinder bersirip dengan *fin pitch* 10 mm.

Pada gambar 4.6 dapat diamati pula bahwa saat intensitas turbulen di belakang silinder sirkular mencapai titik maksimum dengan membentuk tren grafik puncak gelombang, justru sebaliknya daerah di belakang silinder bersirip membentuk tren grafik lembah gelombang. Hal ini disebabkan pada $y/d = 0,6$ saat $x/d = 4$ masih termasuk titik *sparation line* di belakang silinder sirkular, sedangkan pada silinder bersirip daerah tersebut masih dipengaruhi oleh aliran yang melalui celah antar fin. Kecepatan aliran yang keluar melalui celah antar fin cenderung tidak



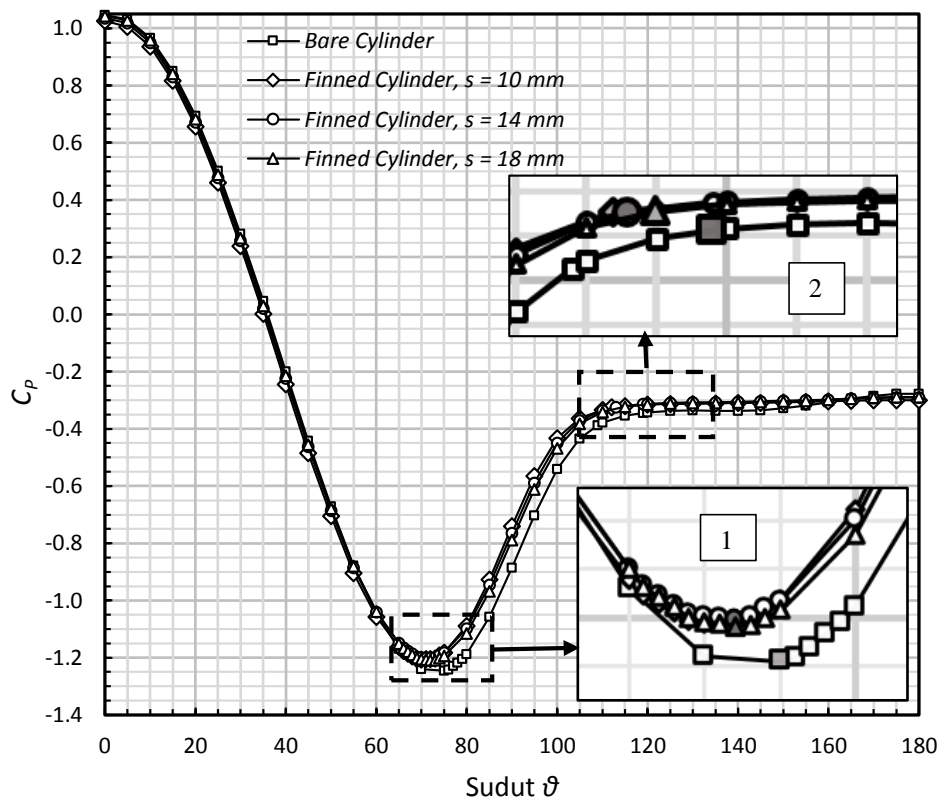
mengalami fluktuasi yang signifikan dibandingkan daerah lainnya sepanjang daerah vertikal *wake* di belakang silinder bersirip. Hal ini pula yang menjadi sebab perbedaan tren grafik intensitas turbulen di belakang silinder sirkular dan silinder bersirip.

4.3. Koefisien Tekanan (C_p) Hasil Simulasi Numerik

4.3.1. Distribusi Koefisien Tekanan (C_p) di Permukaan Silinder

Grafik distribusi koefisien tekanan memberikan informasi tentang evolusi aliran yang melintasi kontur permukaan lengkung silinder serta daerah *base pressure* (daerah bertekanan konstan atau telah terjadi separasi masif). Permukaan yang melengkung menyebabkan kecepatan fluida *freestream* dan kecepatan fluida pada tepi *boundary layer* bervariasi. Kecepatan maksimum diperoleh ketika fluida mencapai puncak lengkungan silinder, namun karena adanya efek viskositas, fluida yang mengalir kehilangan energi. Hal ini menjadi sebab fluida tidak mengalir hingga mencapai titik di belakang silinder sebagaimana aliran *inviscid*.

Pada gambar 4.7 ditampilkan perbandingan distribusi koefisien tekanan pada permukaan silinder sirkular dan silinder bersirip pada $Re\ 2,5 \times 10^4$ di daerah *midspan*. Kecepatan fluida maksimum pada permukaan silinder sirkular terletak pada titik 75° yang ditandai dengan koefisien tekanan terendah yaitu $-1,245$ sedangkan pada silinder bersirip dengan jarak antar fin 10 mm, 14 mm, dan 18 mm kecepatan maksimum masing-masing terletak pada titik 70° , 72° , dan 72° , sebagaimana ditampilkan pada gambar 4.7, pembesaran (1) dengan *marker* berwarna gelap. Letak titik separasi di permukaan silinder sirkular terjadi pada titik 119° dan pada permukaan silinder bersirip dengan jarak antar fin 10 mm, 14 mm, dan 18 mm masing-masing pada titik 112° , 113° , dan 115° . Hal ini sebagaimana ditampilkan pada pembesaran (2) gambar 4.7, *marker* berwarna gelap.



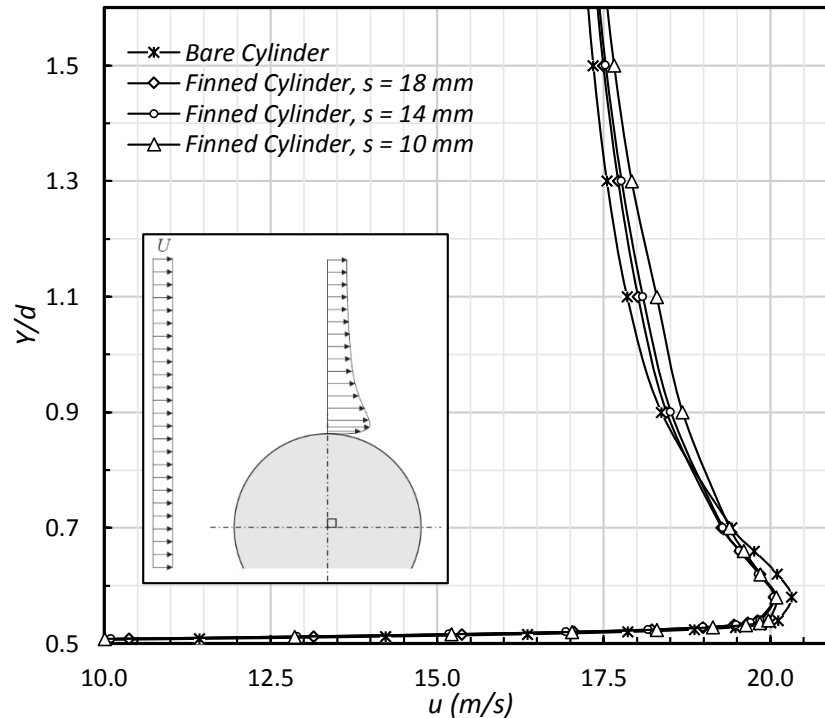
Gambar 4.7 Distribusi koefisien tekanan di permukaan silinder sirkular dan silinder bersirip simulasi numerik pada $Re\ 2,5 \times 10^4$ di daerah *midspan*

Secara visual dapat diamati dari hasil pembesaran grafik pada gambar 4.7 bahwa pada ruang antar fin, silinder dengan *fin pitch* 18 mm menghasilkan grafik C_p berada di atas silinder sirkular diikuti silinder dengan *fin pitch* 14 mm dan 10 mm, namun perbedaan yang terjadi tidak signifikan. Hal ini menggambarkan pada $Re = 2,5 \times 10^4$, semakin rapat jarak antar fin, maka separasi aliran yang terjadi pada ruang antar fin akan terjadi lebih awal. Jarak antar fin menjadi celah yang menyebabkan udara mengalir kurang baik.

Pada gambar 4.8 ditampilkan profil kecepatan di atas permukaan silinder sirkular dan silinder bersirip pada sudut 90° . Aliran dalam *boundary layer* di atas silinder sirkular memiliki energi kinetik dan momentum yang lebih besar, hal tersebut ditandai dengan kecepatan maksimum yang dihasilkan lebih besar dibandingkan kecepatan maksimum di atas silinder bersirip lainnya. Kecepatan maksimum yang lebih besar menjadikan profil kecepatan yang terbentuk lebih penuh dibandingkan profil kecepatan di atas silinder bersirip. Sehingga, profil



aliran di atas silinder sirkular dapat mengalir lebih jauh di sekeliling silinder sebelum terjadi separasi.



Gambar 4.8 Perbandingan profil kecepatan hasil simulasi numerik pada posisi 90° untuk silinder sirkular dan silinder bersirip

4.3.2. Distribusi Koefisien Tekanan (C_p) di Permukaan Fin

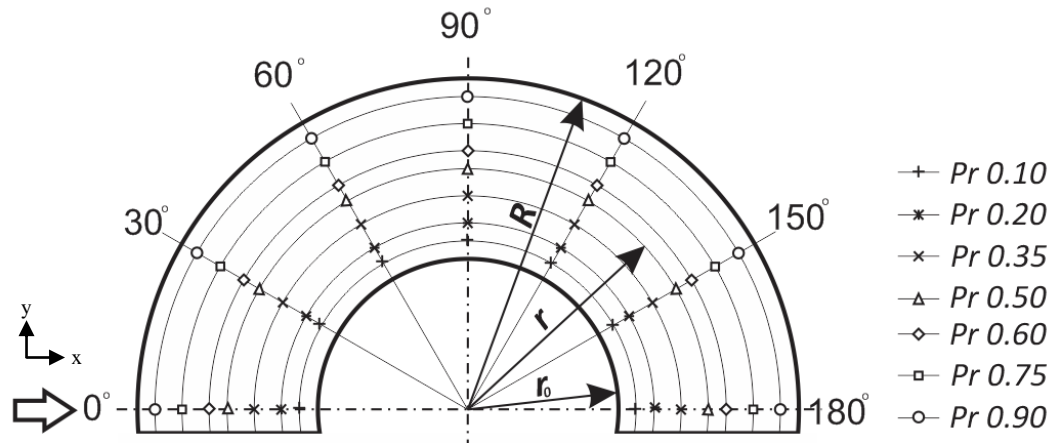
Pola aliran di permukaan fin pada penelitian ini diamati dengan menampilkan distribusi koefisien tekanan di permukaan fin. Pada gambar 4.9 ditampilkan titik pengambilan data numerik distribusi koefisien tekanan di permukaan fin di dekat daerah *midspan*. Jarak antar dua titik koordinat radial yang berdekatan di permukaan fin diatur sejauh 30° dengan titik referensi adalah titik pusat silinder. Sedangkan jarak antar titik dalam satu garis sudut dibedakan dengan koordinat radial nondimensional (Pr) yang didefinisikan sebagai berikut:

$$Pr = \frac{r - r_0}{R - r_0}$$

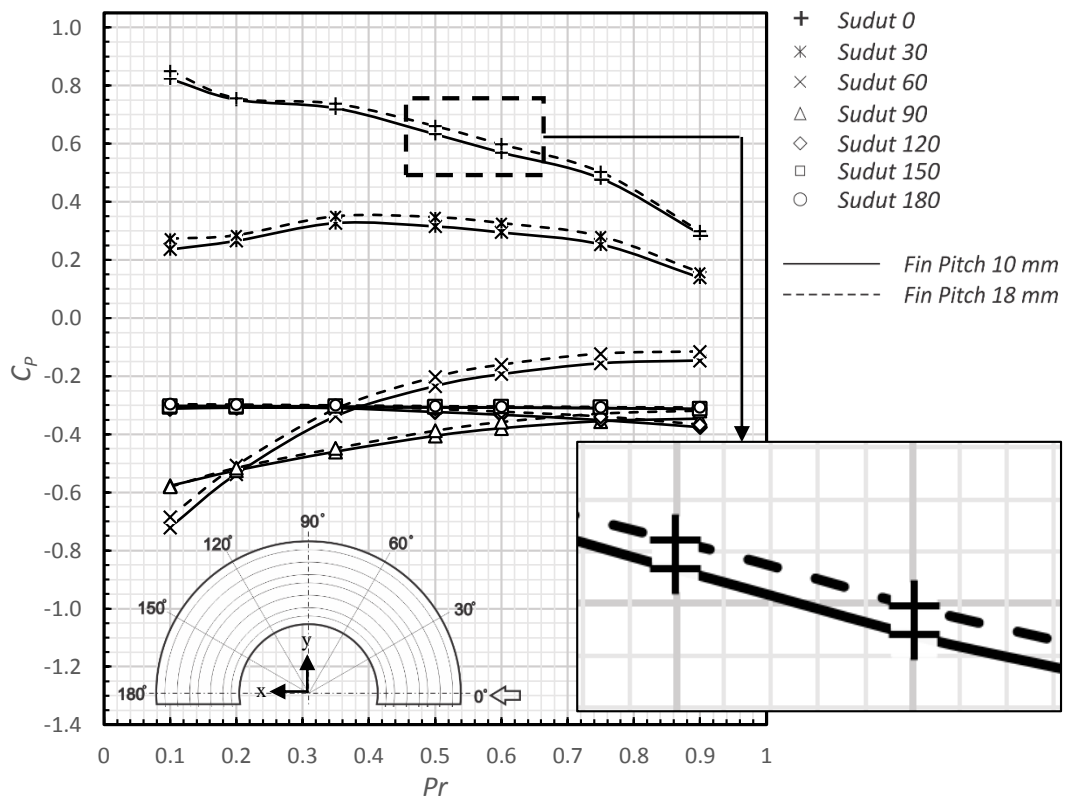
Jari-jari silinder yang merupakan titik pangkal fin (*fin base*) disimbolkan dengan r_0 , sedangkan R adalah jari-jari fin, dan r notasi untuk titik koordinat radial pengambilan data C_p . Sehingga $Pr = 0,10$ adalah titik terdekat dengan *fin base*



sedangkan $Pr = 0,90$ merupakan titik terluar pengambilan data C_P di permukaan fin.



Gambar 4.9 Posisi pengambilan data koefisien tekanan di permukaan fin



Gambar 4.10 Perbandingan distribusi koefisien tekanan simulasi numerik di permukaan fin pada *fin pitch* 10 mm dan 18 mm yang berdekatan dengan *midspan* sebagai fungsi koordinat radial nondimensional.

Hasil data numerik distribusi C_P di permukaan fin sebagai fungsi koordinat radial nondimensional ditampilkan pada gambar 4.10. Sepanjang garis 0° baik *fin*



pitch 10 mm dan 18 mm terjadi perbedaan kecepatan di dekat permukaan fin yang disebabkan oleh perkembangan *boundary layer*. Kecepatan maksimum terjadi pada $P_r = 0,9$ atau pada daerah terluar fin, selanjutnya kecepatan terus mengalami penurunan hingga $P_r = 0,1$ yang ditandai dengan peningkatan koefisien tekanan ke arah *fin base* pada gambar 4.10. Selain pengaruh perkembangan *boundary layer*, variasi kecepatan di permukaan fin sepanjang garis 0° disebabkan juga oleh penurunan tekanan sepanjang dinding vertikal silinder bersirip. Fenomena ini sebagaimana dijelaskan dengan visualisasi aliran hasil simulasi numerik pada gambar 4.12 dan 4.13.

Pada *fin pitch* 10 mm, penurunan tekanan yang cukup signifikan terjadi di permukaan silinder sepanjang garis sudut 60° hingga mencapai koefisien tekanan terendah -0,72 saat $P_r = 0,1$ sebagaimana ditunjukkan pada gambar 4.10. Hal ini terjadi karena aliran fluida memasuki daerah lengkungan silinder dengan kecepatan maksimum. Posisi pada sudut 150° dan 180° adalah daerah *wake* atau daerah separasi masif sehingga distribusi koefisien tekanan relatif konstan di permukaan fin.

Karakteristik aliran pada daerah antar fin dipengaruhi oleh panjang relatif fin terhadap diameter silinder sirkular dan jarak antar fin. Pola aliran untuk panjang relatif fin terhadap diameter silinder, $h/d > 0,4$ di depan silinder ditunjukkan pada gambar 2.5 (a), sedangkan untuk $h/d < 0,4$ pola aliran pada daerah antar fin ditunjukkan pada gambar 2.5 (b). Panjang relatif fin pada penelitian ini terhadap diameter silinder adalah 0,6, sehingga pola aliran yang menjadi acuan sebagai pembandingan adalah pola aliran pada gambar 2.5 (a) sebagaimana telah ditampilkan pada bab 2 sebelumnya.

Pada gambar 4.10 ditampilkan pula perbandingan distribusi koefisien tekanan di permukaan fin pada jarak antar fin 10 mm dan 18 mm. Data ditampilkan sebagai fungsi koordinat radial nondimensional, diambil dari permukaan fin yang berdekatan dengan *midspan*. Tren grafik distribusi koefisien tekanan di permukaan fin pada silinder bersirip dengan jarak antar fin 10 mm dan 18 mm menunjukkan hasil yang identik. Namun pada permukaan fin dengan *fin pitch* 18 mm, grafik distribusi C_p yang dihasilkan memiliki nilai sedikit lebih besar dibandingkan



dengan nilai distribusi C_P pada permukaan fin dengan *fin pitch* 10 mm. Hal ini disebabkan jarak antar fin 10 mm yang lebih sempit menjadikan kecepatan aliran sedikit lebih besar saat memasuki celah antar fin, dan ditunjukkan dengan nilai C_P yang lebih kecil dibandingkan silinder bersirip dengan *fin pitch* 18 mm.

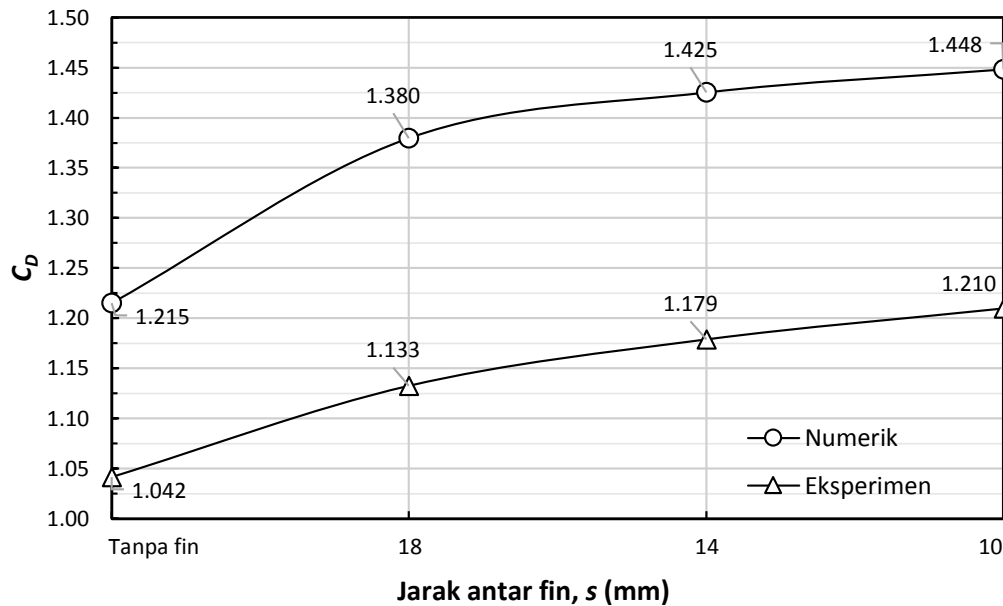
Tabel 4.1 Perbandingan C_P di permukaan silinder hasil simulasi numerik sudut 0° (titik stagnasi)

Koordinat radial nondimensional (P_r)	0,5	0,6
C_P untuk $s = 10$ mm	0,63	0,32
C_P untuk $s = 18$ mm	0,66	0,35
Selisih	4,34 %	10 %

Hal ini dapat ditunjukkan pada hasil pembesaran grafik distribusi C_P pada sudut 0° dengan $P_r = 0,5$ dan $0,6$. Selisih nilai C_P di permukaan fin pada titik tersebut terhadap C_P di permukaan fin dengan *fin pitch* 10 mm masing-masing 4,34% dan 10 %, sebagaimana ditampilkan pada tabel 4.1. Sedangkan pada daerah sudut 120° , 150° , dan 180° nilai C_P untuk variasi jarak antar fin 10 mm dan 18 mm relatif sama, karena pada titik tersebut berada di daerah *base pressure* (daerah *wake*).

4.4. Koefisien *Drag* (C_D)

Silinder bersirip dengan *fin pitch* 10 mm menghasilkan koefisien *drag* (C_D) terbesar baik hasil secara eksperimen maupun hasil simulasi numerik sebagaimana ditampilkan pada gambar 4.11, sedangkan silinder sirkular menghasilkan koefisien *drag* terkecil. Pada tabel 4.2 ditampilkan persentase kenaikan koefisien *drag* silinder bersirip terhadap silinder sirkular untuk masing-masing metode, serta selisih hasil simulasi numerik terhadap hasil eksperimen. Koefisien *drag* silinder bersirip meningkat disebabkan oleh penambahan fin sepanjang silinder yang memberikan kontribusi peningkatan *drag*. Peningkatan *drag* pada silinder bersirip dari hasil eksperimen untuk jarak antar fin 18 mm, 14 mm, dan 10 mm masing-masing 8,73 %, 13,15 %, dan 16,12 %.



Gambar 4.11 Koefisien *drag* silinder sirkular, silinder bersirip dengan *fin pitch* 18 mm, 14 mm, dan 10 mm hasil eksperimen dan simulasi numerik

Tabel 4.2 Perbandingan koefisien *drag* hasil eksperimen dan simulasi numerik

Jarak antar fin, s	Eksperimen		Numerik		Selisih C_D numerik - eksperimen
	C_D	% Kenaikan C_D^*	C_D	% Kenaikan C_D^*	
Tanpa fin	1,042	-	1,215	-	16,60 %
$s = 18$ mm	1,133	8,73 %	1,380	13,58 %	21,80 %
$s = 14$ mm	1,179	13,15 %	1,425	17,28 %	20,87 %
$s = 10$ mm	1,210	16,12 %	1,448	19,18 %	19,67 %

*) Relatif terhadap silinder tanpa fin

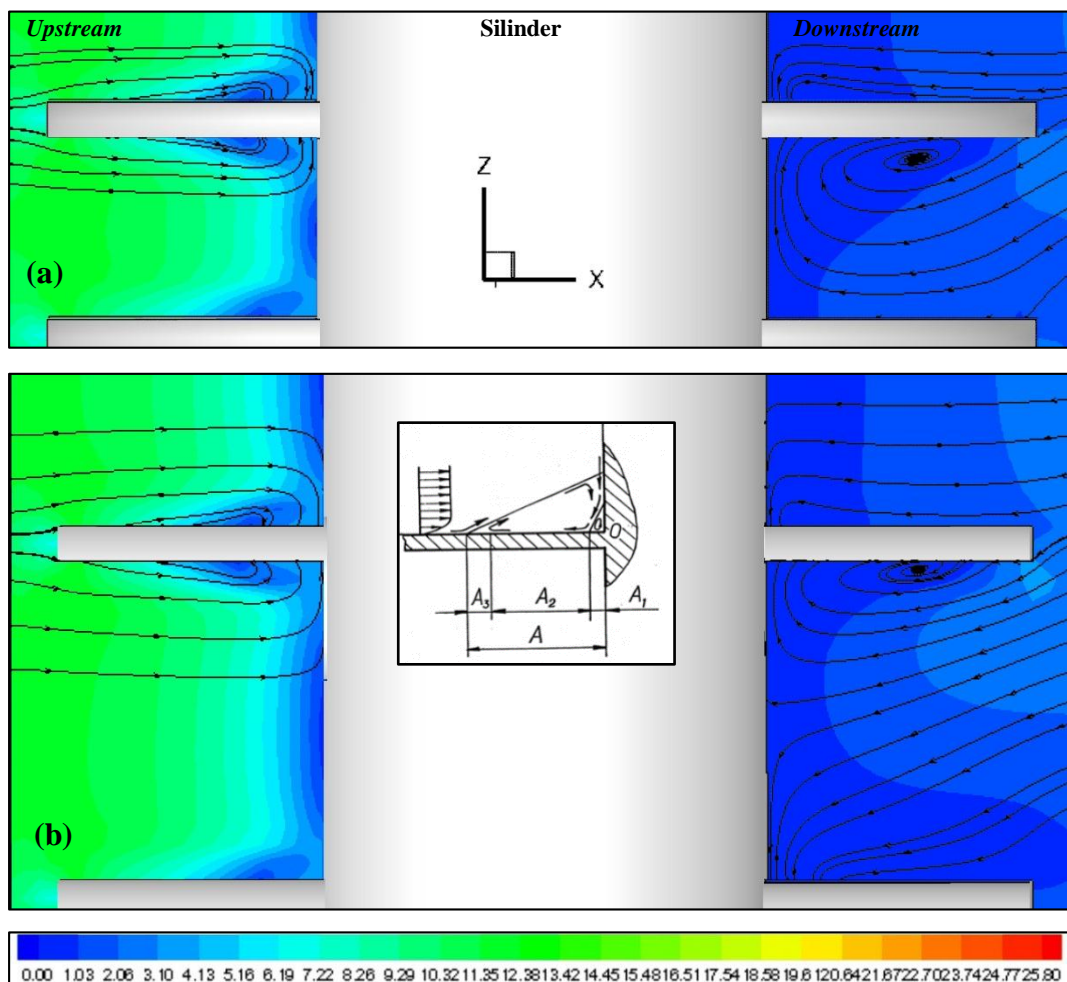
Peningkatan koefisien *drag* sedikit lebih besar ditunjukkan dari hasil simulasi numerik yaitu untuk jarak antar fin 18 mm, koefisien *drag* meningkat 13,58 %, sedangkan jarak antar fin 14 mm dan 10 mm masing-masing mengalami peningkatan 17,28 % dan 19,18 %. Selisih hasil simulasi numerik terhadap hasil eksperimen untuk silinder sirkular sebesar 16,60 %, kemudian silinder bersirip dengan *fin pitch* 18 mm, 14 mm, dan 10 mm masing-masing 21,80 %, 20,87 %, dan 19,67 %. Selisih hasil koefisien *drag* total yang cukup besar antara simulasi numerik dan eksperimen dapat disebabkan oleh akurasi *external force balance* yang digunakan pada penelitian ini kurang baik. Selain itu ketidakpastian hasil simulasi numerik yang sangat tergantung pada bentuk *mesh*, jarak *mesh* yang terdekat



dengan permukaan model benda uji, dan model turbulen yang digunakan dalam simulasi menjadi faktor yang sangat berpengaruh terhadap perbedaan yang cukup signifikan terhadap hasil eksperimen.

4.5. Visualisasi Numerik

Data hasil simulasi numerik yang ditampilkan dan dianalisa pada penelitian ini yaitu, *contour plot*, *vector plot*, dan *pathline plot*. Pola aliran fluida *upstream* dan *downstream* pada celah antar fin ditampilkan dalam visualisasi *contour plot* dan *pathlines plot* ditampilkan pada gambar 4.12.



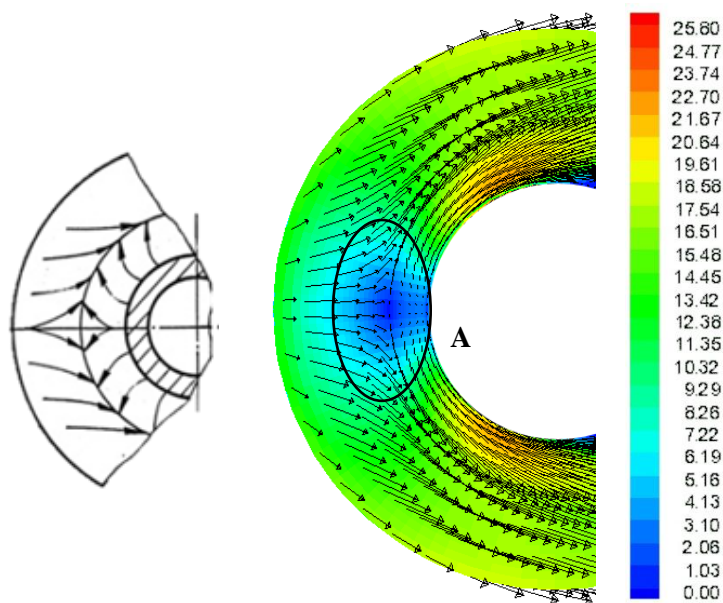
Gambar 4.12 *Pathline* dan vektor kecepatan (m/s) aliran *upstream* dan *downstream* pada celah antar fin dengan *fin pitch* (a) 10 mm dan (b) 18 mm pada daerah *midspan*

Pada gambar 4.12, ditunjukkan pola aliran di depan silinder bersirip dengan *fin pitch* 10 mm dan 18 mm pada daerah *midspan*. Aliran udara bergerak dari saluran



pusat antar fin ke *fin base* sehingga aliran sekunder yang mengalir pada permukaan fin bagian A_2 membentuk daerah separasi aliran (A_3). Pada batas-batas aliran zona ini dapat dicirikan sebagai *counter flow* ke aliran utama. Daerah separasi ini ditunjukkan pada gambar 4.13 dengan lingkaran A di permukaan fin di depan silinder. Daerah separasi tersebut sebelumnya juga ditunjukkan pada gambar 4.10 saat $Pr = 0,2$ untuk sudut 0° .

Pola aliran *downstream* pada celah antar fin di dekat daerah *midspan* terbentuk vorteks baik untuk jarak antar fin 10 mm maupun 18 mm. Pada jarak antar fin 10 mm vorteks terbentuk lebih luas dibandingkan vorteks pada jarak antar fin 18 mm. Hal ini disebabkan aliran *backflow* yang masuk pada celah antar fin 10 mm mengalir pada arah yang sama sebelum membentuk vorteks. Sedangkan aliran *backflow* yang masuk pada celah antar fin 18 mm terbagi ke arah mendekati dan menjauhi daerah *midspan*. Pada panjang silinder yang sama, jarak antar fin yang lebih sempit akan menghasilkan jumlah celah fin yang lebih banyak sehingga vorteks antar fin yang terbentuk akan lebih banyak dibandingkan pada jarak antar fin yang lebih lebar, sebagaimana ditampilkan pada gambar 4.17.

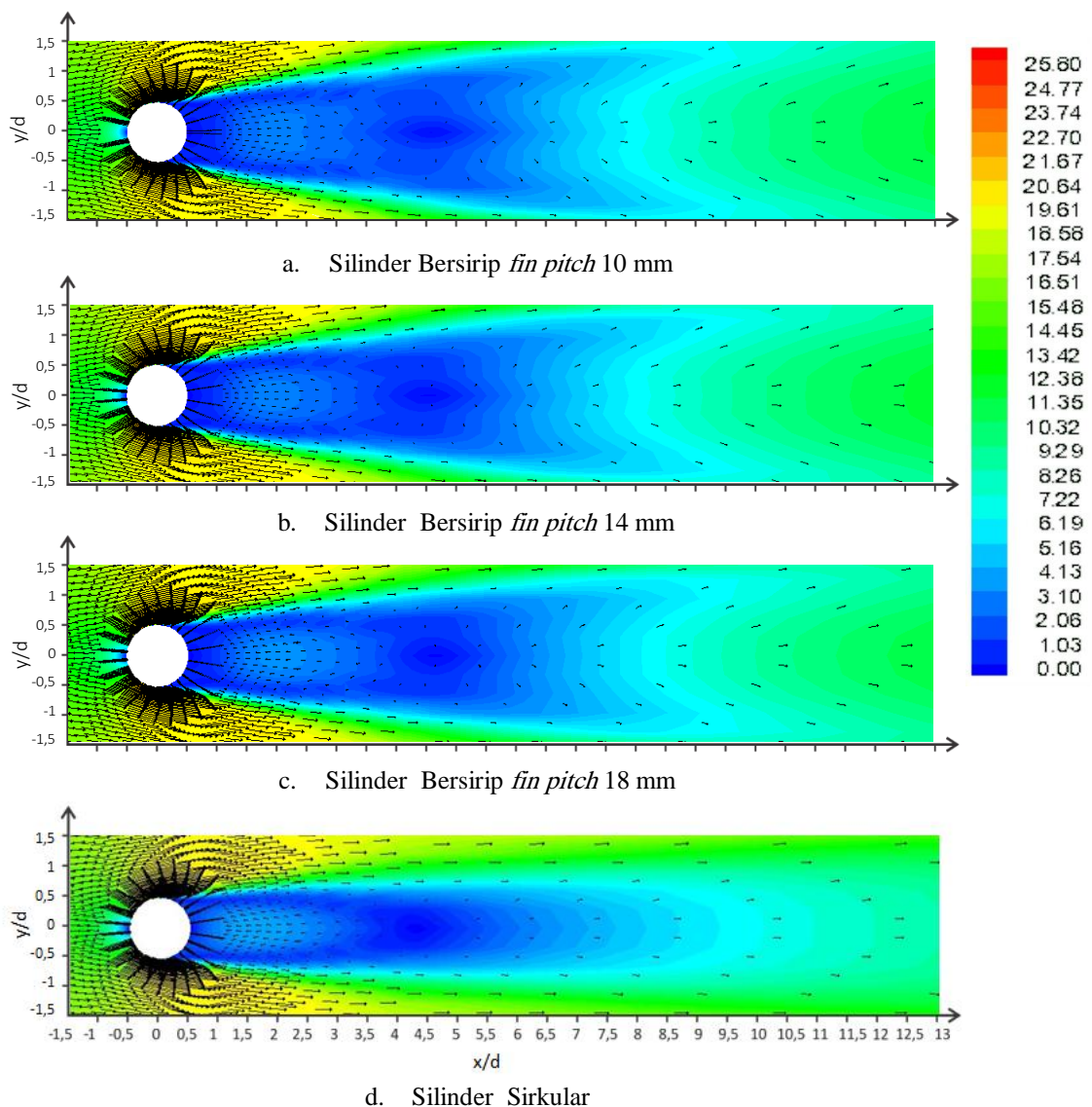


Gambar 4.13 Kontur kecepatan dan vektor kecepatan (m/s) di permukaan fin dengan *fin pitch* 10 mm pada daerah di dekat *midspan*

Pada gambar 4.14 ditunjukkan kontur dan vektor kecepatan di sekitar silinder sirkular dan silinder bersirip dengan jarak antar fin 10 mm, 14 mm, dan 18 mm.



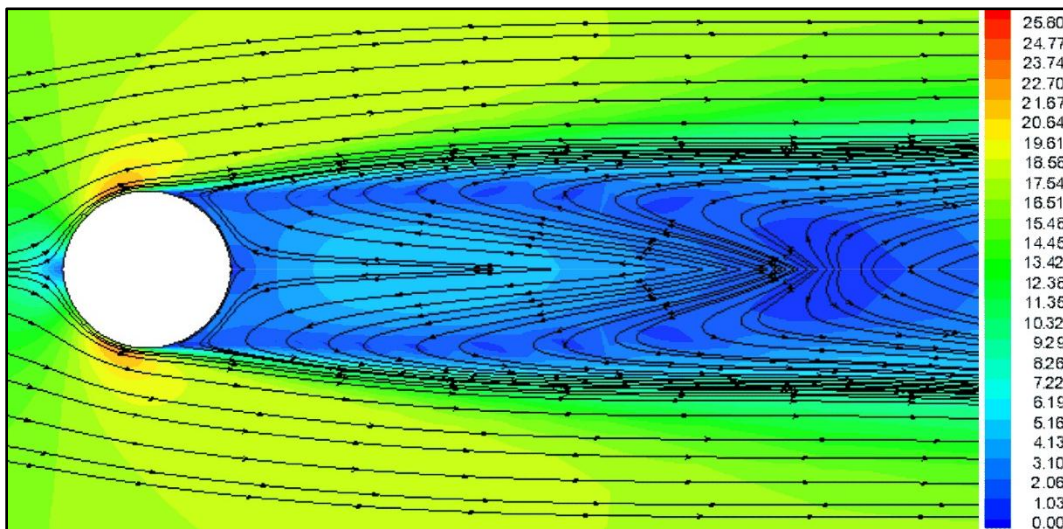
Data yang ditampilkan pada bidang x - y ($z = 0$). Pengaruh penambahan fin di permukaan silinder sirkular terlihat pada daerah *wake* yang terbentuk pada masing-masing variasi jarak antar fin. Hal ini dapat diamati pada silinder sirkular (gambar 4.14 d), luas daerah berwarna biru sebagai daerah kecepatan rendah dan daerah *wake* di belakang silinder sirkular dimulai dari titik separasi aliran di permukaan silinder, kemudian berkembang hingga maksimum $0,6d$ pada batas sumbu y positif. Peningkatan lebar daerah kecepatan rendah dan daerah *wake* semakin jelas terlihat setelah penambahan fin di permukaan silinder dengan variasi *fin pitch* 10 mm, 14 mm dan 18 mm.



Gambar 4.14 *Contour* dan vektor kecepatan (m/s) pada x - y plane ($z = 0$)



Hal tersebut dapat juga diamati dari perbandingan u/U_{max} pada $y/d = 1d$ saat $x/d = 4d$ (sebagaimana ditampilkan pada gambar 4.3), untuk silinder sirkular adalah 0.73, sedangkan untuk silinder bersirip dengan variasi jarak antar fin 10 mm, 14 mm, 18 mm masing-masing adalah 0.32, 0.41, dan 0.46. Hal ini menunjukkan bahwa dengan jarak antar fin yang lebih sempit, pada aliran dengan $Re \ 2 \times 10^5$ dihasilkan daerah *wake* yang lebih luas di belakang silinder yang masih dipengaruhi oleh vorteks.



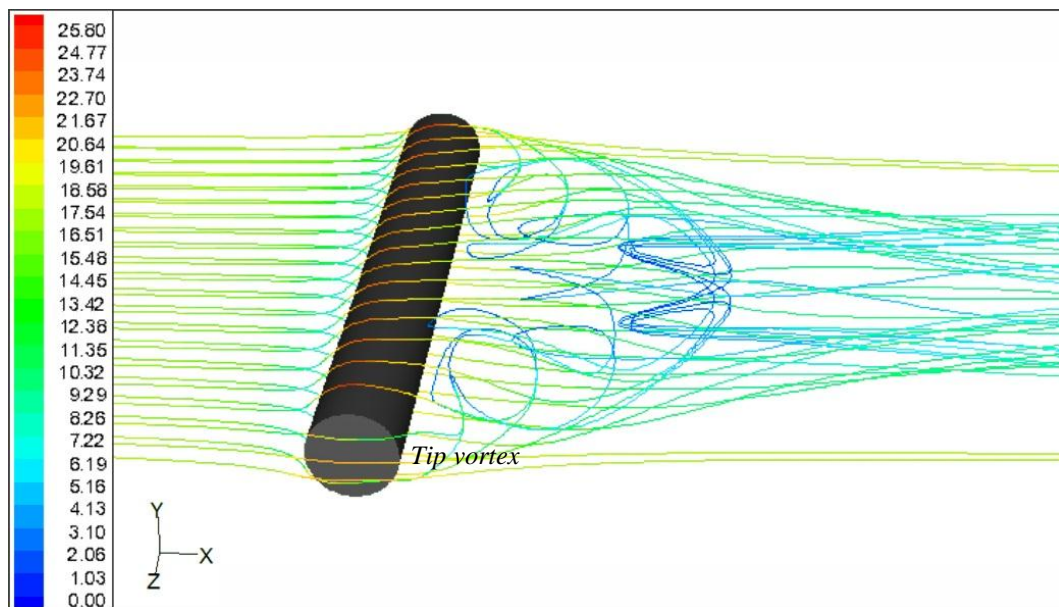
Gambar 4.15 *Pathline* kecepatan aliran fluida (m/s) pada daerah *midspan* silinder sirkular (tanpa fin)

Pada gambar 4.15 ditampilkan *pathline* dan kontur kecepatan di belakang silinder sirkular. Medan kecepatan aliran rata-rata yang ditampilkan adalah potongan simetris pada daerah *midspan*. Berdasarkan gambar tersebut, jika dibandingkan dengan *pathline* aliran hasil penelitian Khashehchi dkk (2014) (sebagaimana ditampilkan pada gambar 2.3 sebelumnya), maka akan didapatkan perbedaan pola aliran di daerah *wake*. Pada penelitian Khashehchi dkk (2014), aliran dua dimensi di belakang silinder membentuk dua vorteks sejajar dan bergerak dengan arah yang berlawanan sehingga membentuk pasangan vorteks pada daerah *wake*.

Pola aliran di daerah *wake* yang terbentuk di belakang silinder sirkular pada penelitian ini tidak membentuk pasangan vorteks dengan arah aliran tertutup (*close loop*) sebagaimana umumnya vorteks aliran 2D di belakang silinder sirkular. Hal

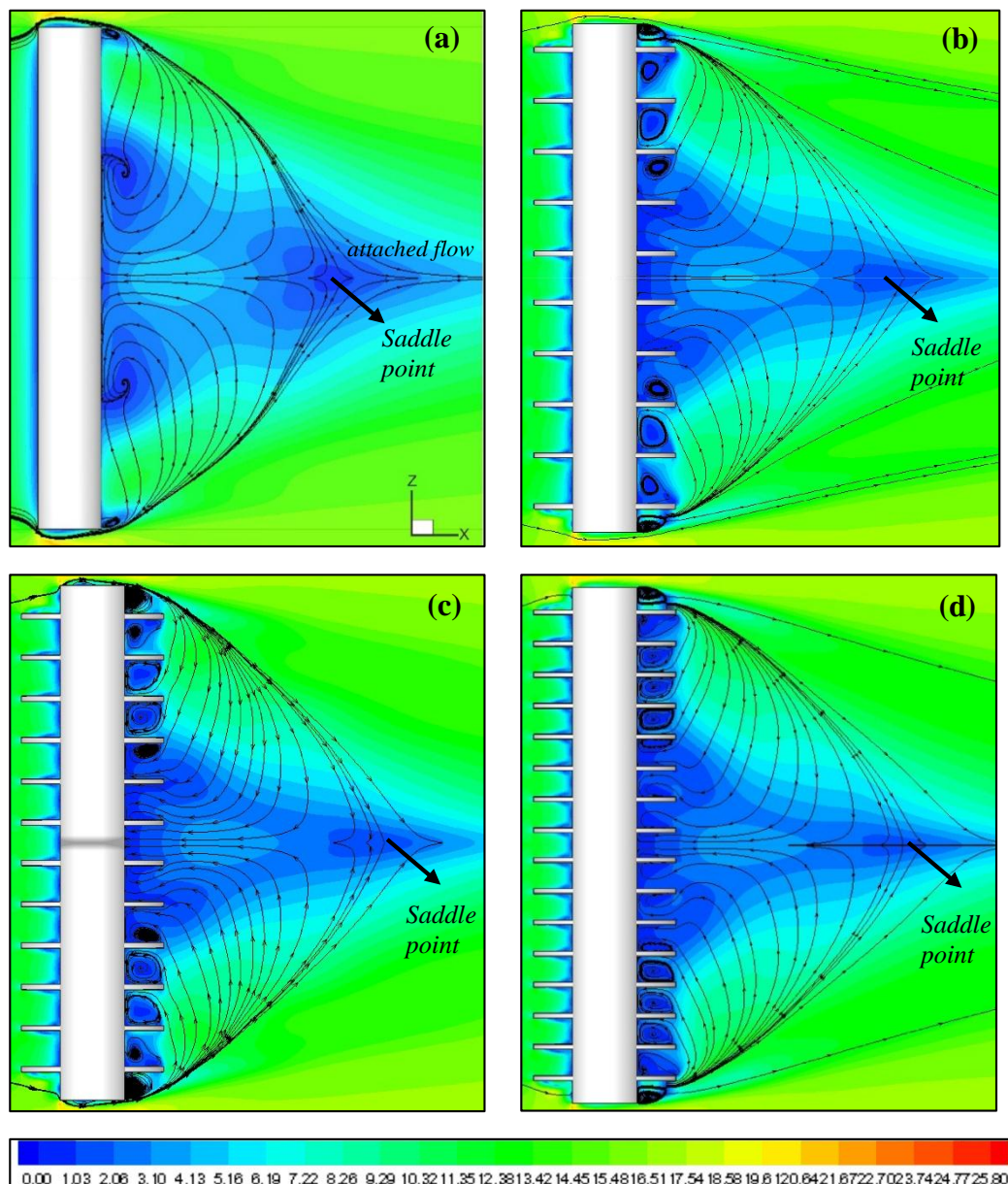


ini disebabkan pada penelitian ini ditetapkan *clearance* antara silinder dan dinding *wind tunnel* yang disesuaikan dengan kondisi eksperimen untuk memungkinkan akuisisi *drag* total dari *external force balance*. *Gap* antara silinder dan dinding menjadi ruang untuk terbentuknya aliran tiga dimensi berupa *tip vortex* dari kedua ujung silinder. *Tip vortex* mengalir ke arah bidang simetris yang sangat mempengaruhi bentuk *wake* yang terjadi di belakang silinder sirkular dan silinder bersirip. Pengaruh *tip vortex* terhadap pola aliran *wake* dapat dengan jelas diamati pada gambar 4.16 - 4.19.



Gambar 4.16 *Pathline* kecepatan aliran fluida (m/s) melalui silinder sirkular 3D

Pada gambar 4.16 ditampilkan *pathline* aliran 3D yang melalui silinder sirkular dengan panjang $8d$ yang ditempatkan pada saluran dengan lebar $12d$. Pengaruh *tip vortex* yang mengalir melalui ujung silinder terhadap daerah *wake* di belakang silinder sirkular dapat dilihat dengan baik. *Tip vortex* memotong aliran fluida dari arah *upstream* yang telah melewati silinder sirkular. Hal ini menyebabkan terbentuknya *trailing vortex* yang menyeret aliran dari atas dan bawah silinder ke daerah *midspan*. *Trailing vortex* terjadi karena kebocoran aliran sekitar ujung silinder dari daerah yang bertekanan tinggi ke daerah yang bertekanan rendah di belakang silinder. Hal ini sebagaimana dapat lebih jelas diamati pada gambar 4.17.

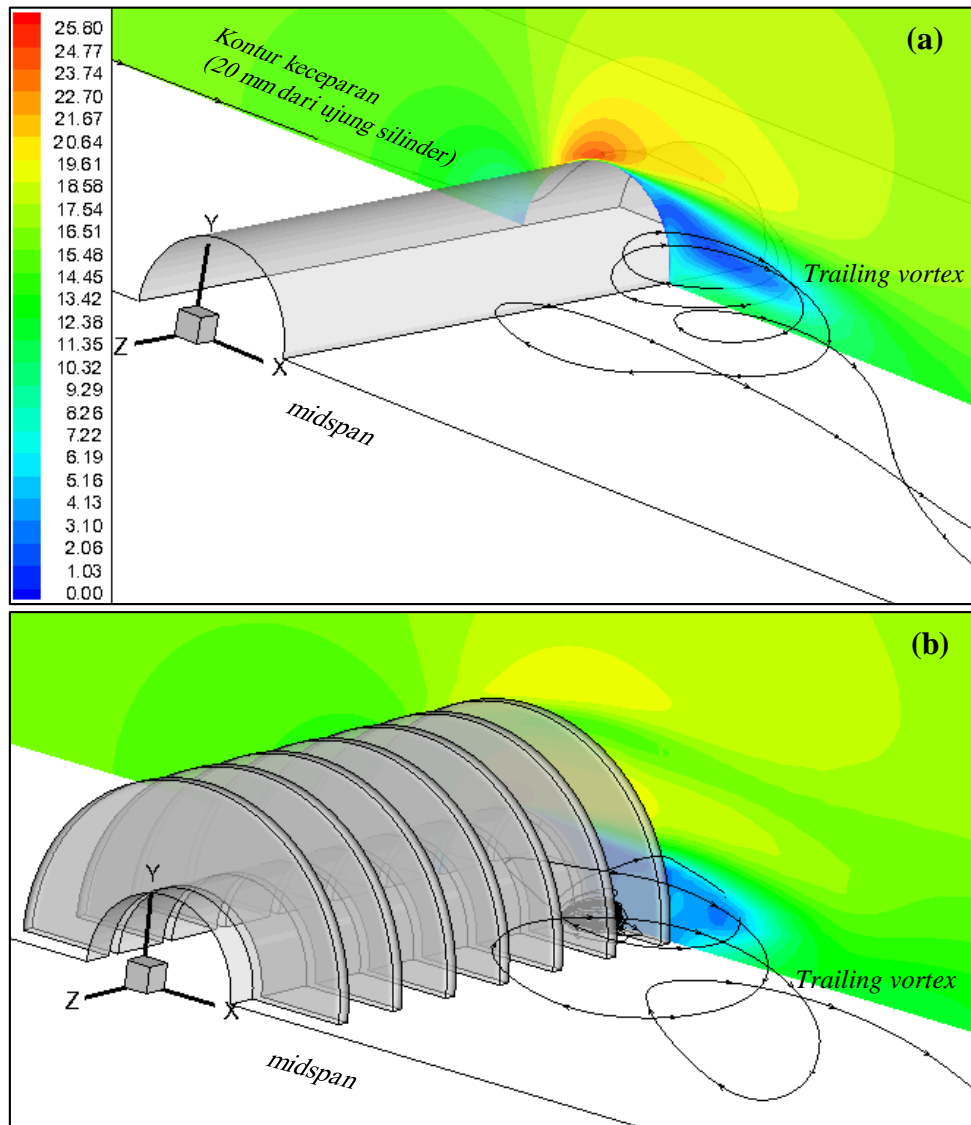


Gambar 4.17 *Pathline* dan kontur kecepatan aliran fluida (m/s) pada daerah *midspan* (a) tanpa fin, (b) *fin pitch* 18 mm, (c) *fin pitch* 14 mm, dan (d) *fin pitch* 10 mm

Pada gambar 4.17 ditampilkan visualisasi aliran bidang x - z sejajar *centerline* silinder. Pada gambar tersebut ditunjukkan pengaruh yang cukup kuat dari *tip vortex* pada daerah *wake* silinder sirkular maupun silinder bersirip. Pada daerah di belakang silinder adalah daerah yang memiliki tekanan rendah dan cenderung konstan (sepaimana telah ditunjukkan pada gambar 4.7 dan 4.10). Hal tersebut memungkinkan aliran dari ujung silinder yang membentuk *tip vorteks*, mengalir ke daerah di belakang silinder. Pada daerah *downstream* di dekat ujung silinder tidak



terbentuk vorteks akibat adanya pertemuan aliran dari permukaan silinder dan ujung silinder berupa *tip vortex* yang membentuk *trailing vortex* ke arah *midspan*. Hal ini sebagaimana ditampilkan pada gambar 4.18 (a), *pathline* yang merupakan aliran *trailing vortex* memotong *slice* kontur kecepatan di belakang silinder ditandai dengan daerah berwarna hijau.

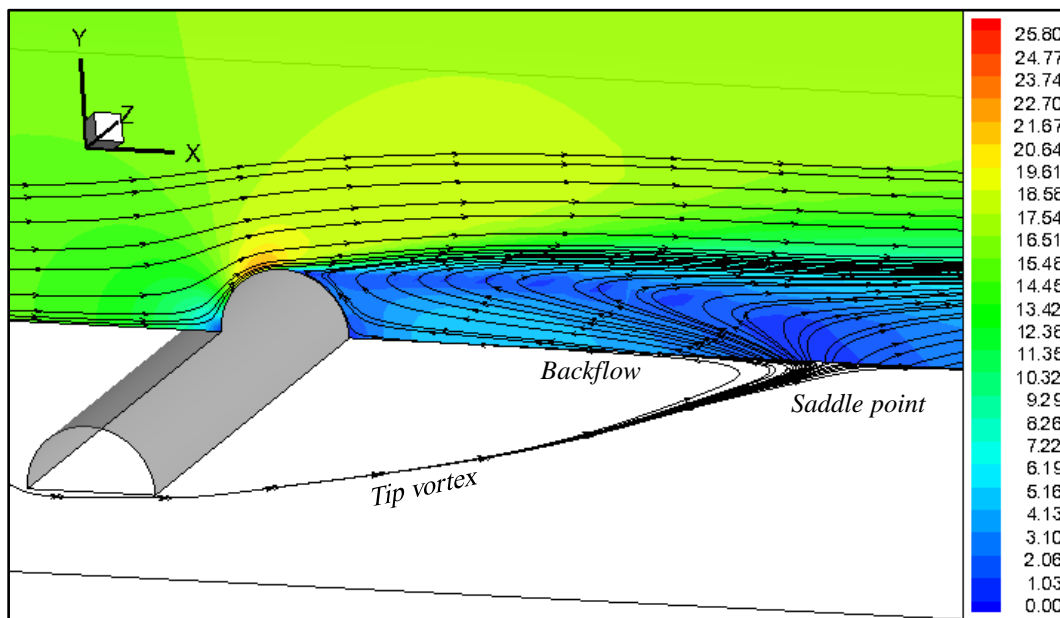


Gambar 4.18 *Pathline* aliran 3D dan kontur kecepatan aliran fluida (m/s) pada daerah 20 mm dari ujung silinder yang sejajar *midspan*, (a) silinder sirkular dan (b) silinder bersirip dengan *fin pitch* 10 mm

Sedangkan pada silinder bersirip, fin yang dipasang pada silinder menjadikan pola aliran yang terbentuk semakin kompleks, dimana pada setiap celah antar fin terbentuk vorteks yang bermula dari aliran *tip vortex* (lihat gambar 4.18 (b)). Ujung



fin di daerah *downstream* memungkinkan aliran dari ujung silinder membentuk vorteks pada setiap celah antar fin. Kecepatan vorteks di pusat adalah nol dan meningkat secara proporsional sesuai jarak dari pusatnya. Vorteks akan terlepas lalu menjadi vorteks bebas dan akhirnya terseret aliran ke arah belakang menjauhi silinder. Pelepasan vorteks akan menimbulkan gaya-gaya berupa gaya *lift* dan gaya *drag* yang bekerja pada silinder secara periodik. Berdasarkan persamaan 2.7 dan 2.10, semakin besar resultan gaya (searah *freestream*) dan selisih tekanan *upstream* dan *downstream* yang bekerja pada permukaan benda, gaya *drag* akan semakin meningkat. Sehingga semakin banyak vorteks yang terbentuk, maka akan menghasilkan *induced drag* yang besar terutama pada silinder bersirip dengan jarak antar fin yang lebih sempit. Silinder bersirip menghasilkan daerah *wake* yang lebih panjang sebelum terjadi *attached flow*.



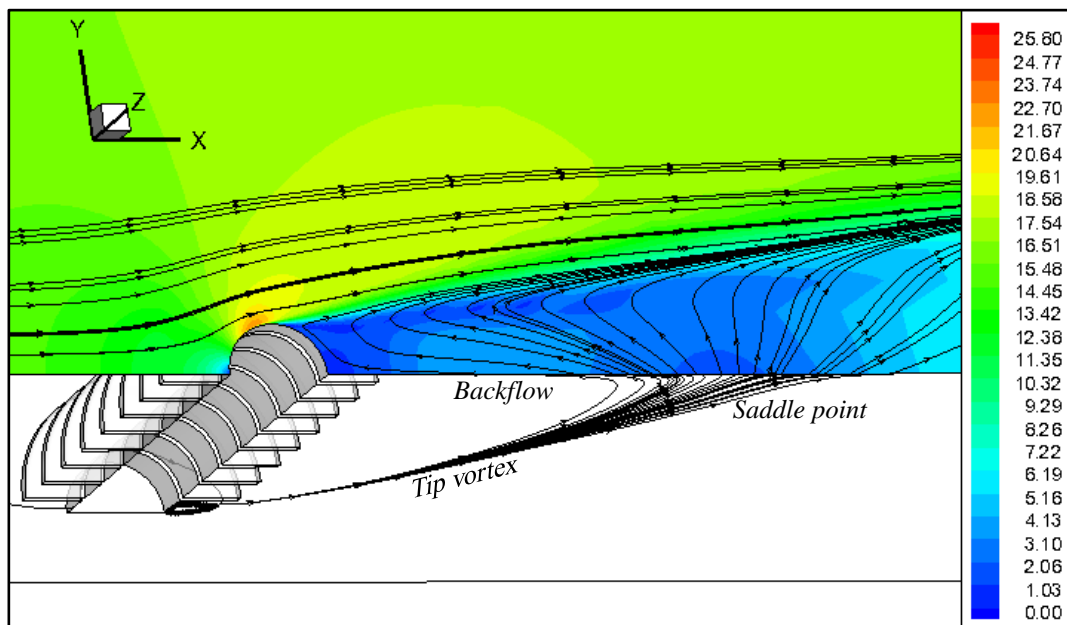
Gambar 4.19 *Pathline* dan kontur kecepatan aliran fluida (m/s) pada daerah *midspan* silinder sirkular (bidang simetris x - y)

Pada gambar 4.19 ditampilkan gambar tiga dimensi seperempat bagian silinder sirkular dengan visualisasi aliran pada daerah *midspan* dan bidang simetris x - z simulasi numerik. *Separation bubble* terbentuk setelah aliran lepas dari ujung silinder, kemudian terus berlanjut sampai pada daerah *midspan*. Daerah *wake* terus berkembang di belakang silinder hingga pada bidang simetris dengan jarak $4d$ dari



sumbu silinder. Arah aliran pada bidang tersebut membentuk *saddle point*, dimana aliran terbagi menjadi *backflow* dan aliran yang terus mengalir ke arah *downstream* (*attached flow*).

Fenomena serupa terjadi pada silinder bersirip sebagaimana ditampilkan pada gambar 4.20. Akan tetapi luas daerah *wake* yang terbentuk lebih besar dibandingkan daerah *wake* yang terbentuk di belakang silinder sirkular. Hal ini disebabkan oleh separasi di permukaan silinder bersirip yang terbentuk lebih awal dibandingkan separasi yang terjadi di permukaan silinder sirkular. Faktor lain yang mempengaruhi luas daerah *wake* silinder bersirip adalah *tip vortex* akibat fin yang terpasang pada silinder. Panjang fin yang melebar menempati medan aliran menjadikan *separation bubble* terbentuk lebih luas di belakang silinder bersirip. *Attachment saddle* terbentuk pada daerah *wake* bidang simetris dengan jarak $5d$ dari sumbu silinder.

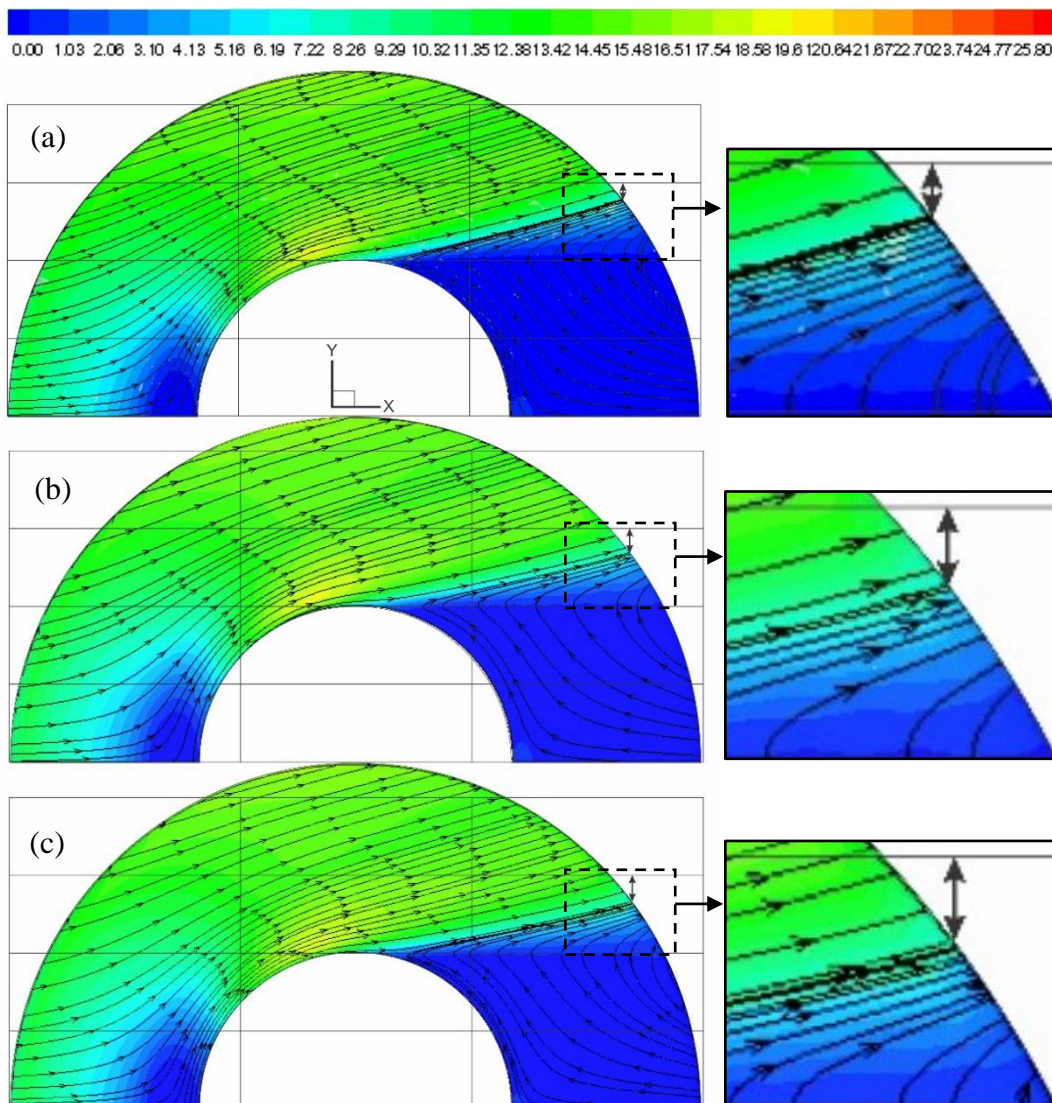


Gambar 4.20 *Pathline* dan kontur kecepatan aliran fluida (m/s) pada daerah *midspan* (bidang simetris x - y) silinder bersirip dengan *fin pitch* 10 mm

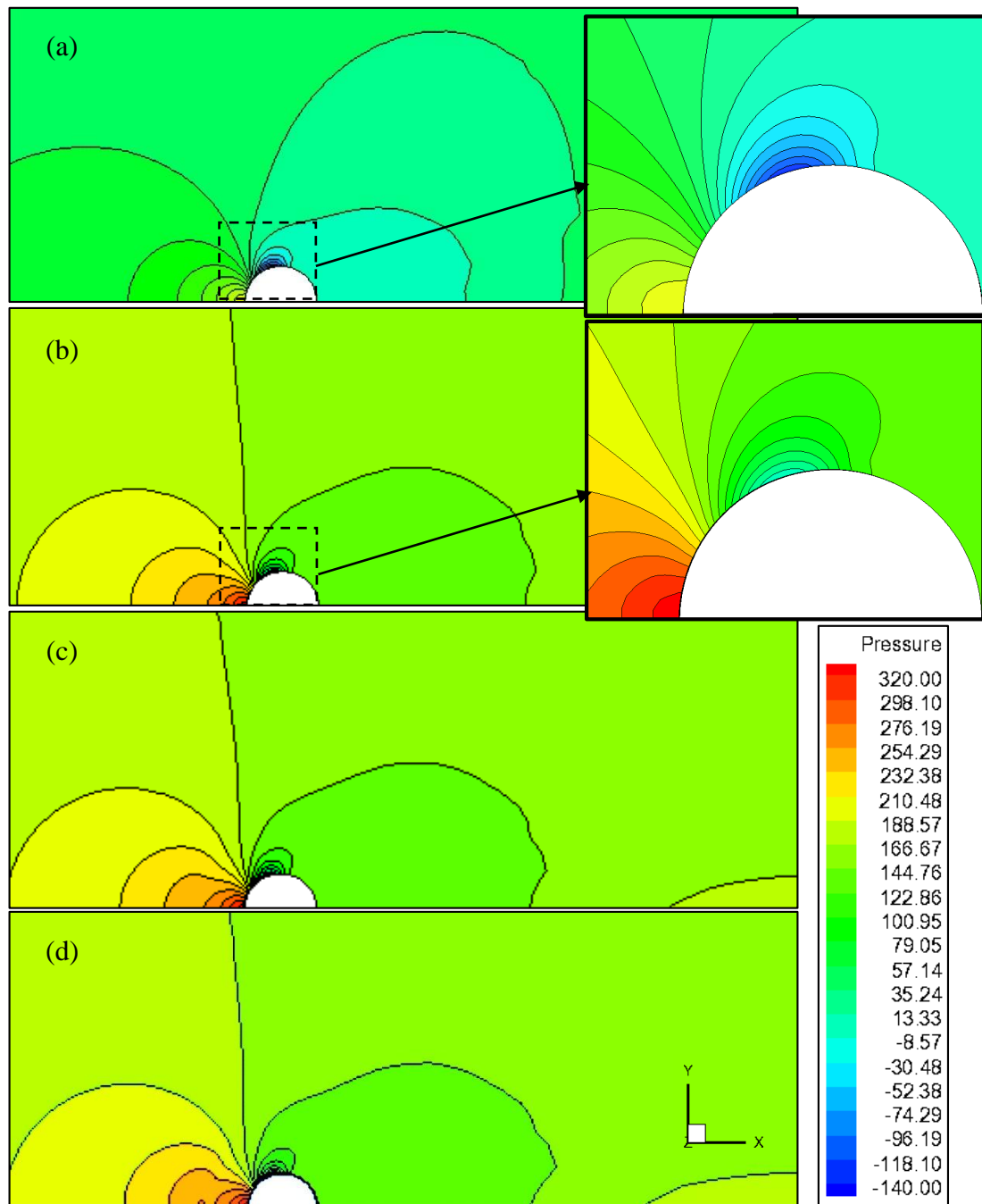
Pola aliran di permukaan fin ditampilkan pada gambar 4.21. Ketika jarak antar fin meningkat, posisi separasi aliran dan vorteks bergerak mendekat ke daerah di belakang silinder, sebagaimana ditunjukkan dengan garis-garis dua anak panah pada pembesaran gambar 4.21. Garis panah terpanjang terhadap garis bantu vertikal



adalah garis panah permukaan dengan *fin pitch* 18 mm, kemudian 14 mm, dan 10 mm. Hasil ini menunjukkan bahwa udara tidak mengalir dengan baik pada daerah tersebut untuk *fin pitch* yang sempit. Kecendrungan ini identik dengan pola aliran di permukaan fin yang dilakukan oleh Yoshida dkk (2006) sebagaimana ditampilkan pada gambar 2.7 sebelumnya. Pergeseran daerah separasi mempengaruhi koefisien perpindahan panas pada daerah tersebut, sebagaimana telah dijelaskan pada gambar 2.6.



Gambar 4.21 *Pathline* dan kontur kecepatan (m/s) di permukaan fin untuk masing-masing variasi jarak antar fin; (a) *pitch* 10 mm, (b) *pitch* 14 mm, (c) *pitch* 18 mm



Gambar 4.22 Kontur tekanan statis (Pa) pada bidang *midspan*, (a) silinder sirkular, (b) silinder bersirip *fin pitch* 18 mm, (c) silinder bersirip *fin pitch* 14 mm, (d) silinder bersirip *fin pitch* 10 mm

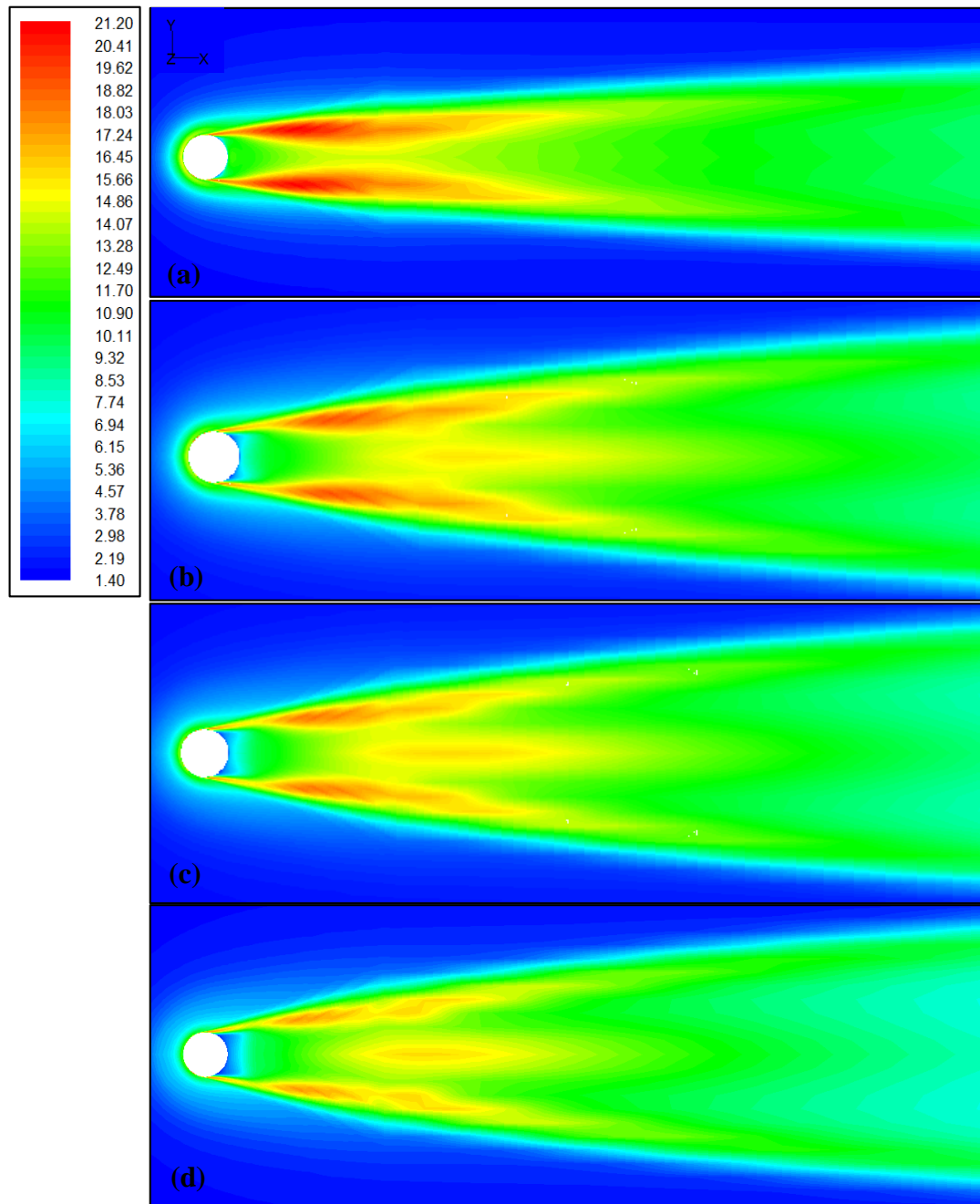
Pada gambar 4.22 ditampilkan hasil simulasi numerik kontur tekanan statis (Pa) pada bidang simetris x - y untuk silinder sirkular dan silinder bersirip. Pada gambar tersebut terlihat bahwa tekanan paling besar terjadi pada daerah *leading edge*, baik untuk silinder sirkular maupun silinder bersirip. Nilai tekanan yang besar



ini ditunjukkan dengan warna merah untuk silinder bersirip dan warna kuning untuk silinder sirkular. kontur tekanan statis di sekitar silinder bersirip antara silinder dan dinding *wind tunnel* terdapat garis separasi warna kontur tekanan. Hal ini karena fin yang dipasang pada silinder menempati ruang antara silinder dan dinding *wind tunnel*, sehingga mengurangi luas frontal aliran. Penyempitan ruang frontal ini menjadikan kecepatan aliran disekitar silinder bersirip sedikit meningkat dan tekanan pada daerah tersebut mengalami penurunan.

Nilai tekanan terbesar yang diperoleh sepanjang garis arus adalah tekanan stagnasi jika efek ketinggian diabaikan. Hal ini karena pada titik stagnasi, aliran fluida menumbuk permukaan silinder sehingga kecepatan pada titik tersebut nol (ditunjukkan dengan warna biru di depan silinder pada gambar 4.15). Aliran kemudian terbagi, sebagian mengalir di atas silinder dan sebagian lagi di bawah silinder. Kecepatan fluida mengalami peningkatan selama melintasi lengkungan depan silinder, maka setelah melewati *leading edge*, tekanan mengalami penurunan sampai mencapai tekanan minimum yang ditunjukkan dengan warna biru. Hal ini berlaku untuk silinder sirkular maupun silinder bersirip, namun tekanan statis pada medan aliran silinder sirkular lebih kecil dibandingkan dengan tekanan statis pada medan aliran silinder bersirip. Setelah melewati puncak silinder sirkular dan silinder bersirip, tekanan statis di belakang silinder cenderung konstan.

Pada gambar 4.23 ditampilkan kontur intensitas turbulensi pada bidang *midspan* untuk silinder sirkular dan silinder bersirip. Berdasarkan gambar 4.5, pada jarak $4d$ dari *centerline* silinder, intensitas turbulensi terbesar terjadi di belakang silinder sirkular kemudian silinder bersirip dengan jarak antar fin 18 mm, 14 mm, dan 10 mm. Hal tersebut diperjelas dengan visualisasi kontur intensitas turbulensi pada gambar 4.23, dimana daerah warna merah yang menunjukkan intensitas turbulensi terbesar terbentuk lebih luas di belakang silinder sirkular dibandingkan intensitas turbulensi di belakang silinder bersirip. Kecepatan aliran yang keluar melalui celah antar fin mengurangi luas daerah intensitas turbulensi maksimum, namun memberikan kontribusi daerah *wake* yang lebih luas.

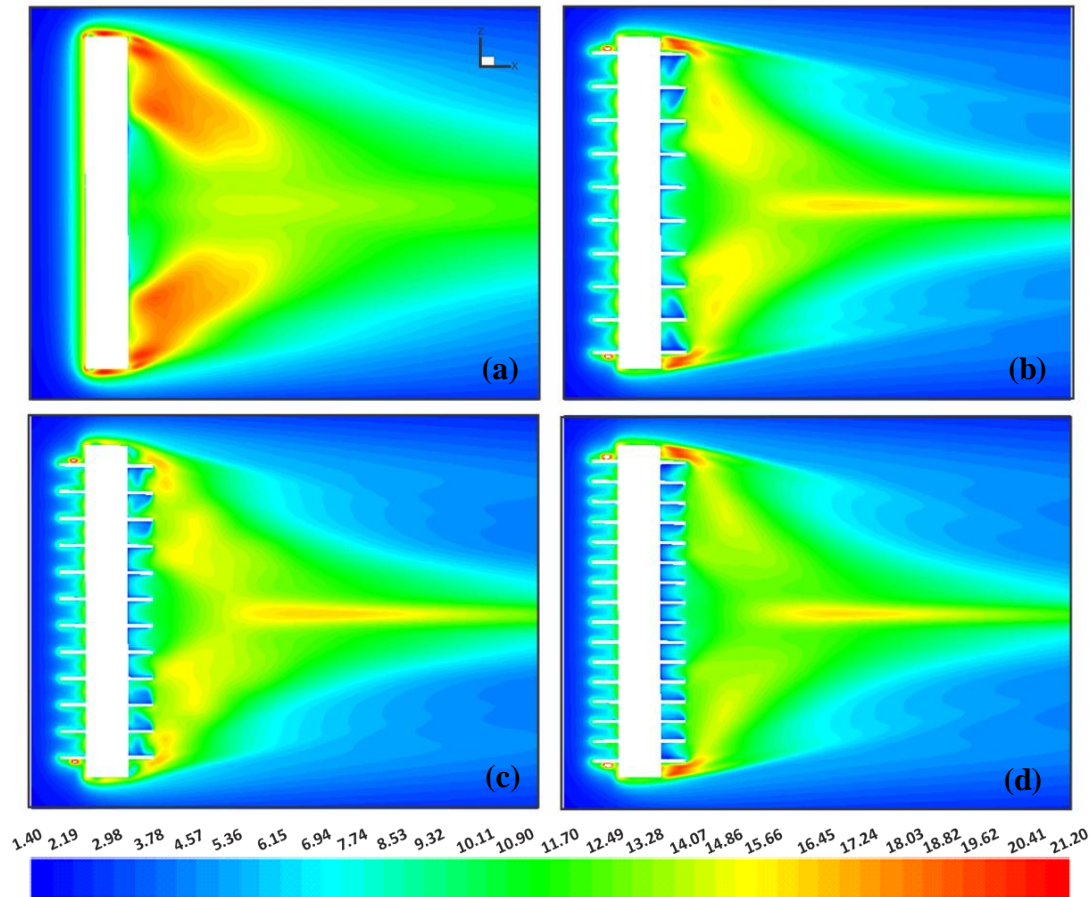


Gambar 4.23 Kontur intensitas turbulensi (%) pada bidang *midspan*, (a) tanpa fin, (b) *fin pitch* 18 mm, (c) *fin pitch* 14 mm, dan (d) *fin pitch* 10 mm

Intensitas turbulensi maksimum yang terjadi, terdistribusi pada daerah di dekat *sparation line*. Hal ini disebabkan karena daerah *wake* merupakan daerah dengan kecepatan rendah dibandingkan daerah di luar *sparation line* sehingga daerah di dekat *sparation line* terjadi fluktuasi kecepatan yang cukup besar. Selain fluktuasi kecepatan, nilai intensitas turbulensi juga dipengaruhi oleh kecepatan rata-



rata pada daerah yang diamati. Semakin besar nilai kecepatan rata-rata aliran pada daerah yang diamati, maka nilai intensitas turbulensi akan semakin kecil.



Gambar 4.24 Kontur intensitas turbulensi (%) pada daerah potongan simetris *centerline* silinder (a) tanpa fin, (b) *fin pitch* 18 mm, (c) *fin pitch* 14 mm, dan (d) *fin pitch* 10 mm

Pada gambar 4.24 ditampilkan kontur intensitas turbulensi pada daerah potongan simetris *centerline* silinder. Intensitas turbulensi tertinggi terjadi pada daerah di dekat ujung silinder sirkular. Pada daerah tersebut aliran terparasi di ujung silinder kemudian membentuk *trailing vortex* ke arah *downstream* dengan intensitas turbulensi yang cukup besar yang ditandai dengan warna merah. Visualisasi olakan aliran di ujung silinder sirkular dan silinder bersirip ($s = 10$ mm) dapat juga diamati pada gambar 4.18. Intensitas turbulensi di belakang silinder bersirip cenderung berkurang ketika jarak antar fin semakin kecil. Hal ini disebabkan aliran dari ujung silinder bersirip berupa *tip vortex* terperangkap di ruang antar fin sebelum mengalir ke arah *downstream*.



BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Pengamatan karakteristik *drag* pada silinder dengan *annular fin* dengan variasi jarak antar fin telah dilakukan menggunakan metode eksperimen dan simulasi numerik. Berdasarkan pembahasan dan analisa data, baik secara eksperimen maupun simulasi numerik, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Penambahan fin pada permukaan silinder sirkular menghasilkan pola *wake* yang lebih lebar dibandingkan pola *wake* yang dihasilkan oleh silinder sirkular.
2. Semakin dekat jarak antar fin, maka pola *wake* di belakang silinder bersirip semakin lebar dan berbanding lurus terhadap gaya *drag* yang dihasilkan.
3. Berdasarkan hasil eksperimen, peningkatan *drag* pada silinder bersirip untuk jarak antar fin 18 mm, 14 mm, dan 10 mm masing-masing 8,73 %, 13,15 %, dan 16,12 %. Sedangkan dari hasil simulasi numerik, peningkatan koefisien *drag* untuk jarak antar fin 18 mm, koefisien *drag* meningkat 13,58 %, jarak antar fin 14 mm dan 10 mm masing-masing mengalami peningkatan 17,28 % dan 19,18 %.
4. Intensitas turbulen terbesar pada daerah *wake* dengan jarak $4d$ dari *centerline* silinder, yaitu pada silinder sirkular dengan $y/d = 0,6$ sebesar 17,8 %, kemudian silinder bersirip dengan *fin pitch* 18 mm, 14 mm, dan 10 mm intensitas turbulen tertinggi terjadi pada $y/d = 0,92$, masing-masing 17,2 %, 16,6 %, dan 15,5 %.
5. Nilai maksimum intensitas turbulen pada silinder sirkular dan silinder bersirip merupakan batas dari *sparation line*, maka fluktuasi kecepatan terbesar terjadi pada *sparation line*.
6. Letak titik separasi di permukaan silinder sirkular terjadi pada titik 119° dan pada permukaan silinder bersirip dengan jarak antar fin 10 mm, 14 mm, dan 18 mm masing-masing pada titik 112° , 113° , dan 115° . Oleh



karena itu, dapat disimpulkan bahwa semakin rapat jarak antar fin, maka separasi aliran yang terjadi pada ruang antar fin akan terjadi lebih awal.

7. Ketika jarak antar fin semakin rapat, posisi separasi aliran dan vorteks di permukaan fin semakin lebar. Hal ini menunjukkan bahwa udara tidak mengalir dengan baik pada daerah tersebut untuk *fin pitch* yang sempit.
8. Simulasi numerik dengan pendekatan *3D-steady flow Reynolds Averaged-Navier Stokes* (RANS) dan RNG *k-ε* cukup baik untuk mengamati karakteristik aliran di sekitar silinder bersirip.

5.2 Saran

Beberapa saran dapat diberikan dari hasil pengamatan yang telah dilakukan pada penelitian dengan menggunakan metode eksperimen dan simulasi numerik ini. Saran-saran berikut diharapkan menjadi acuan untuk penelitian-penelitian selanjutnya terutama yang berkaitan dengan penelitian aliran melalui silinder bersirip:

1. Penggunaan *external force balance* untuk pengambilan data *drag* total sebaiknya mempertimbangkan keakuratan akuisisi data dengan memastikan alat telah memiliki data pembanding yang baik.
2. Pengambilan data eksperimen sebaiknya pada kondisi temperatur dan tekanan lingkungan yang sama untuk berbagai variasi penelitian. Hal ini dimaksudkan agar data yang diperoleh dari variasi tersebut tidak terpengaruh dengan kondisi lingkungan yang ada.
3. Simulasi numerik dapat dilakukan dengan membandingkan beberapa model turbulen untuk mendapatkan model yang mendekati hasil uji eksperimen.



DAFTAR PUSTAKA

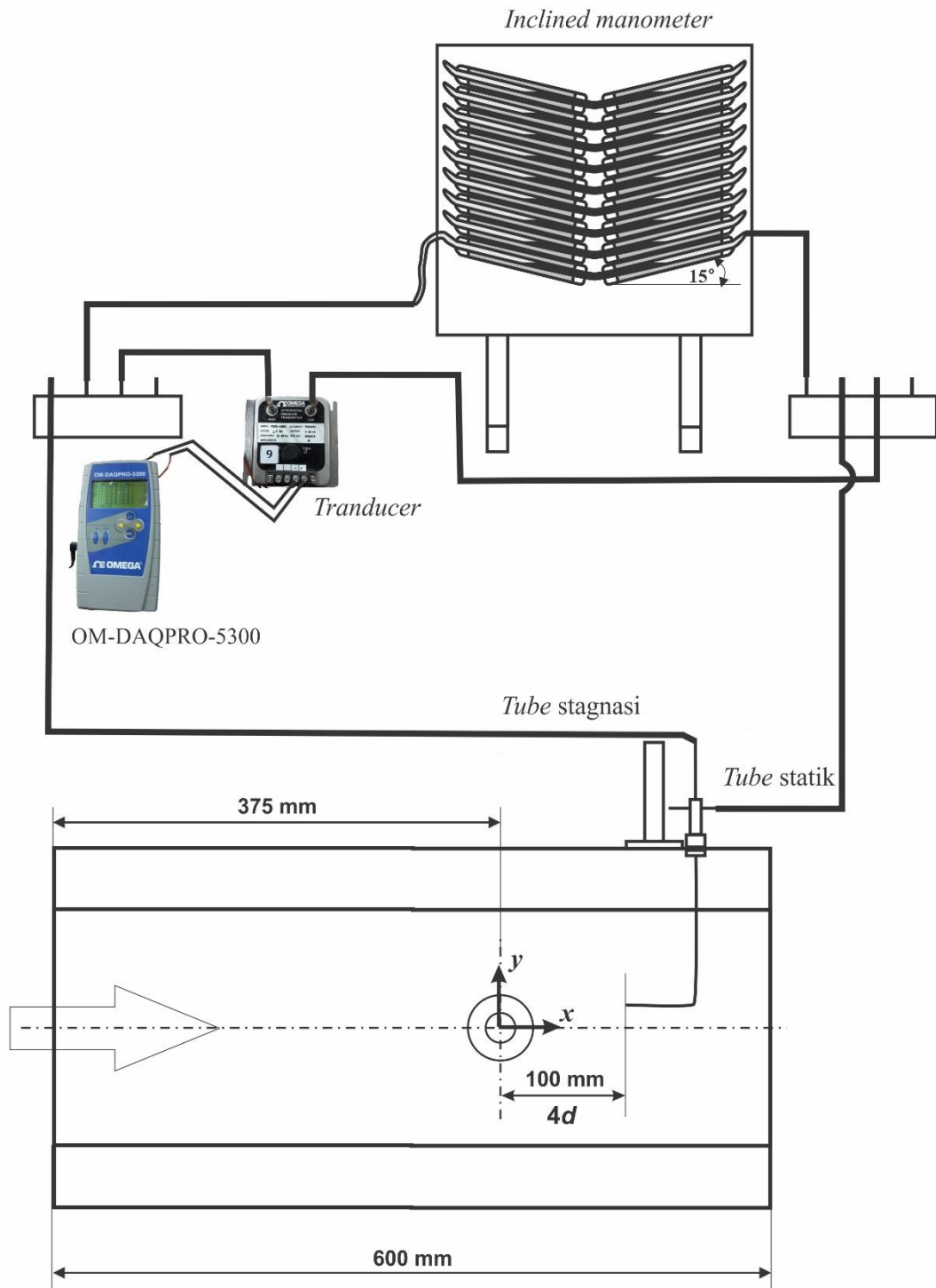
- Bantacut dan Widodo, Wawan A. (2014), *Studi Eksperimen Pengaruh Penggunaan Inlet Disturbance Body (IDB) Terhadap Reduksi Gaya Hambat pada Tiga Silinder Sirkular dengan Susunan Stagger*, Tesis Master, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Fluent Inc., (2007), *GAMBIT 2.4 User's Guide*, Fluent Inc., Lebanon.
- Fluent Inc., (2006a), *FLUENT 6.3 Tutorial Guide*, Fluent Inc., Lebanon.
- Fluent Inc., (2006b), *FLUENT 6.3 User's Guide*, Fluent Inc., Lebanon.
- Fox, Robert W., Pritchard, Philip J., McDonald, Alan T., (2010), *Introduction to Fluid Mechanics*, 7th edition, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Huang, C. H. dan Chung, Y. L. (2014), "The Determination of Optimum Shapes for Fully Wet Annular Fns for Maximum Efficiency", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 73, hal. 436-446.
- Ishima, T., Sasaki, T., Gokan, Y., Takahashi, Y., Obokata, T. (2008), "Flow Characteristics around an Inclined Circular Cylinder with Fin", *Proceedings of 14th Int Symp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*, Lisbon, Portugal, hal. 1-10.
- Khashehchi, K., Abdi, I. A., Hooman, K., Roesgen, T. (2014), "A Comparison between The Wake behind Finned and Foamed Circular Cylinders in Cross-Flow", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 52, hal. 328-338.
- Ladjedel, A.O., Yahiaoui, B.T., Adjlout, C.L., Imine, D.O. (2011), "Experimental and Numerical Studies of Drag Reduction on a Circular Cylinder" *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 15, No. 5, Hal. 339-343.
- Munson, B., R., Young, D. F., Okishi, T.H., Huebsch, W. W., (2009), *Fundamentals of Fluid Mechanics*, 6th edition, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Pis'mennyi, E.N., Terekh, A.M., Polupan, G.P., Mariscal, I. C., Sanchez, S. F. (2014), "Universal Relations for Calculation of The Drag of Transversely Finned Tube Bundles", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 73, hal. 293-302.
- Pis'mennyi, E.N. (2012), "Regularities of Flow and Heat Transfer at The Surface of Transversely Finned Tubes", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, hal. 5016-5031.
- Sorathiya, A. S., Parmar, A. N., Rathod, P. P. (2014), "Review Paper on Effect of Cylinder Block Fin Geometry on Heat Transfer Rate of Air-Cooled 4S SI Engine", *International Journal of Recent Development in Engineering and Technology*, Vol. 2, hal. 33-38.



- Triyogi, Y., Suprayogi, D., Spirda, E. (2009), "Reducing The Drag on a Circular Cylinder by Upstream Installation of an I-Type Bluff Body as Passive Control" *Journal Mechanical Engineering Science*, Vol. 223, hal. 2291-2296.
- Widodo, Wawan A., Triyogi, Y., Indiyono, P., Aryawan, Wasis D. (2009), "Pengendalian Aliran Pasif pada Silinder Sirkular Disturbance Body Berbentuk Silinder Elip (AR 1/4)" *Jurnal Teknik Mesin*, Vol. 11, No. 1, hal 1-11.
- Yoshida, M., Ishihara, S., Murakami, Y., Nakashima, K., Yamamoto, M. (2006), "Air-Cooling Effects on a Motorcycle Engine", *JSME International Journal*, Vol. 49, No.3, hal. 869-875.

LAMPIRAN

1. Data Profil Kecepatan dari Hasil Eksperimen



Gambar skema alat eksperimen pengambilan data profil kecepatan pada jarak $4d$ dari *centerline* silinder di belakang silinder sirkular dan silinder bersirip

Tabel data profil kecepatan di belakang silinder sirkular					
y/d	Pembacaan arus OM-DAQPRO	Δh inclined manometer	Tekanan dinamik	u	u/U_{max}
	mA	mm	Pa	m/s	
5.52	9.891	22.652	178.481	17.416	0.986
5.32	9.939	22.868	180.186	17.499	0.991
5.12	9.990	23.098	181.997	17.587	0.996
4.92	9.995	23.120	182.174	17.596	0.996
4.72	10.004	23.161	182.494	17.611	0.997
4.52	10.036	23.305	183.630	17.666	1.000
4.32	10.026	23.260	183.275	17.649	0.999
4.12	9.978	23.044	181.571	17.566	0.994
3.92	9.980	23.053	181.642	17.570	0.995
3.72	9.947	22.904	180.470	17.513	0.991
3.52	9.952	22.927	180.647	17.522	0.992
3.32	9.992	23.107	182.068	17.590	0.996
3.12	9.983	23.066	181.748	17.575	0.995
2.92	9.957	22.949	180.825	17.530	0.992
2.72	9.948	22.909	180.505	17.515	0.991
2.52	9.944	22.891	180.363	17.508	0.991
2.32	9.964	22.981	181.073	17.542	0.993
2.12	9.985	23.075	181.819	17.578	0.995
1.92	10.034	23.296	183.559	17.662	1.000
1.72	9.999	23.138	182.316	17.602	0.996
1.52	9.761	22.066	173.864	17.190	0.973
1.32	9.245	19.740	155.540	16.259	0.920
1.12	8.001	14.134	111.363	13.757	0.779
0.92	6.514	7.432	58.556	9.976	0.565
0.72	5.197	1.496	11.787	4.476	0.253
0.52	4.430	-1.961	-15.451	-	-
0.32	4.063	-3.615	-28.484	-	-
0.12	3.978	-3.998	-31.503	-	-
-0.08	3.966	-4.052	-31.929	-	-
-0.28	4.003	-3.885	-30.615	-	-
-0.48	4.095	-3.471	-27.348	-	-
-0.68	4.723	-0.640	-5.046	-	-
-0.88	5.746	3.970	31.283	7.291	0.413
-1.08	7.077	9.969	78.550	11.554	0.654
-1.28	8.664	17.122	134.908	15.142	0.857
-1.48	9.530	21.025	165.661	16.779	0.950
-1.68	9.850	22.467	177.025	17.345	0.982
-1.88	9.899	22.688	178.765	17.430	0.987

-2.08	9.880	22.602	178.090	17.397	0.985
-2.28	9.922	22.791	179.582	17.470	0.989
-2.48	9.947	22.904	180.470	17.513	0.991
-2.68	9.947	22.904	180.470	17.513	0.991
-2.88	9.923	22.796	179.617	17.472	0.989
-3.08	9.962	22.972	181.002	17.539	0.993
-3.28	9.977	23.039	181.535	17.565	0.994
-3.48	9.999	23.138	182.316	17.602	0.996
-3.68	10.006	23.170	182.565	17.614	0.997
-3.88	10.027	23.265	183.311	17.650	0.999
-4.08	10.014	23.206	182.849	17.628	0.998
-4.28	10.007	23.175	182.600	17.616	0.997
-4.48	10.016	23.215	182.920	17.632	0.998
-4.68	10.011	23.193	182.742	17.623	0.998
-4.88	10.003	23.157	182.458	17.609	0.997
-5.08	10.003	23.157	182.458	17.609	0.997
-5.28	9.877	22.589	177.984	17.392	0.985
-5.48	9.802	22.251	175.320	17.261	0.977

Tabel data profil kecepatan di belakang silinder bersirip, $s = 10 \text{ mm}$					
y/d	Pembacaan arus OM-DAQPRO	Δh inclined manometer	Tekanan dinamik	u	u/U_{max}
	mA	mm	Pa	m/s	
5.52	10.043	23.337	183.879	17.678	0.977
5.32	10.118	23.675	186.542	17.805	0.984
5.12	10.179	23.950	188.709	17.908	0.990
4.92	10.221	24.139	190.200	17.979	0.994
4.72	10.264	24.333	191.727	18.051	0.998
4.52	10.289	24.446	192.615	18.093	1.000
4.32	10.277	24.391	192.189	18.073	0.999
4.12	10.243	24.238	190.981	18.016	0.996
3.92	10.199	24.040	189.419	17.942	0.992
3.72	10.195	24.022	189.277	17.935	0.991
3.52	10.199	24.040	189.419	17.942	0.992
3.32	10.166	23.891	188.247	17.886	0.989
3.12	10.179	23.950	188.709	17.908	0.990
2.92	10.135	23.751	187.146	17.834	0.986
2.72	10.153	23.833	187.785	17.865	0.987
2.52	10.194	24.017	189.241	17.934	0.991
2.32	10.240	24.225	190.875	18.011	0.995
2.12	10.258	24.306	191.514	18.041	0.997
1.92	9.991	23.102	182.032	17.589	0.972

1.72	9.215	19.605	154.475	16.203	0.896
1.52	8.027	14.251	112.286	13.814	0.764
1.32	6.729	8.401	66.191	10.606	0.586
1.12	5.517	2.938	23.150	6.272	0.347
0.92	4.775	-0.406	-3.200	-	-
0.72	4.214	-2.935	-23.122	-	-
0.52	4.100	-3.448	-27.170	-	-
0.32	4.057	-3.642	-28.697	-	-
0.12	4.071	-3.579	-28.200	-	-
-0.08	4.081	-3.534	-27.845	-	-
-0.28	4.071	-3.579	-28.200	-	-
-0.48	4.093	-3.480	-27.419	-	-
-0.68	4.307	-2.515	-19.819	-	-
-0.88	5.011	0.658	5.181	2.967	0.164
-1.08	6.208	6.052	47.689	9.003	0.498
-1.28	7.448	11.641	91.725	12.485	0.690
-1.48	8.910	18.230	143.644	15.624	0.864
-1.68	9.878	22.593	178.019	17.394	0.961
-1.88	10.082	23.513	185.264	17.744	0.981
-2.08	10.110	23.639	186.258	17.792	0.983
-2.28	10.095	23.571	185.726	17.766	0.982
-2.48	10.099	23.589	185.868	17.773	0.982
-2.68	10.124	23.702	186.755	17.815	0.985
-2.88	10.102	23.603	185.974	17.778	0.983
-3.08	10.112	23.648	186.329	17.795	0.984
-3.28	10.143	23.788	187.430	17.848	0.986
-3.48	10.140	23.774	187.324	17.843	0.986
-3.68	10.148	23.810	187.608	17.856	0.987
-3.88	10.144	23.792	187.466	17.849	0.987
-4.08	10.181	23.959	188.780	17.912	0.990
-4.28	10.191	24.004	189.135	17.929	0.991
-4.48	10.174	23.927	188.531	17.900	0.989
-4.68	10.172	23.918	188.460	17.897	0.989
-4.88	10.173	23.923	188.495	17.898	0.989
-5.08	10.137	23.760	187.217	17.837	0.986
-5.28	10.074	23.477	184.980	17.731	0.980
-5.48	9.928	22.818	179.795	17.480	0.966

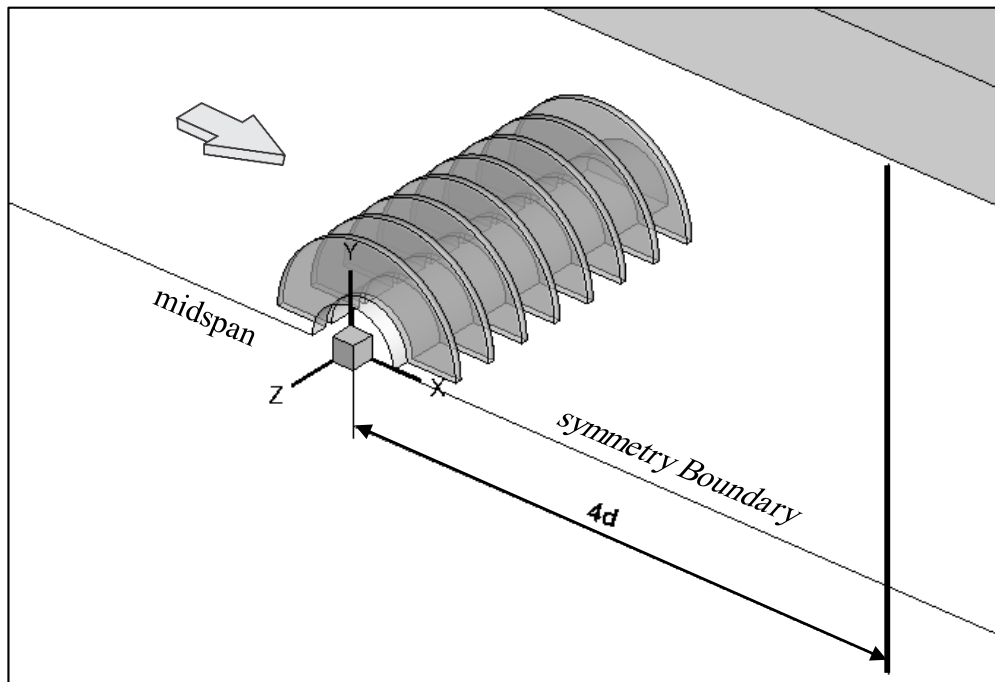
Tabel data profil kecepatan di belakang silinder bersirip, $s = 14 \text{ mm}$					
y/d	Pembacaan arus OM-DAQPRO	Δh inclined manometer	Tekanan dinamik	u	u/U_{max}
	mA	mm	Pa	m/s	
5.52	10.056	23.395	184.341	17.700	0.980
5.32	10.110	23.639	186.258	17.792	0.985
5.12	10.126	23.711	186.826	17.819	0.987
4.92	10.159	23.860	187.998	17.875	0.990
4.72	10.179	23.950	188.709	17.908	0.992
4.52	10.175	23.932	188.567	17.902	0.992
4.32	10.171	23.914	188.424	17.895	0.991
4.12	10.154	23.837	187.821	17.866	0.990
3.92	10.167	23.896	188.282	17.888	0.991
3.72	10.142	23.783	187.395	17.846	0.988
3.52	10.175	23.932	188.567	17.902	0.992
3.32	10.171	23.914	188.424	17.895	0.991
3.12	10.153	23.833	187.785	17.865	0.989
2.92	10.161	23.869	188.069	17.878	0.990
2.72	10.162	23.873	188.105	17.880	0.990
2.52	10.144	23.792	187.466	17.849	0.989
2.32	10.194	24.017	189.241	17.934	0.993
2.12	10.236	24.207	190.733	18.004	0.997
1.92	10.266	24.342	191.798	18.054	1.000
1.72	10.153	23.833	187.785	17.865	0.989
1.52	9.644	21.539	169.710	16.983	0.941
1.32	8.968	18.492	145.703	15.736	0.872
1.12	7.425	11.537	90.908	12.430	0.688
0.92	5.828	4.340	34.195	7.623	0.422
0.72	4.658	-0.933	-7.355	-	-
0.52	3.968	-4.043	-31.858	-	-
0.32	3.681	-5.337	-42.050	-	-
0.12	3.578	-5.801	-45.708	-	-
-0.08	3.694	-5.278	-41.588	-	-
-0.28	3.932	-4.205	-33.136	-	-
-0.48	4.084	-3.520	-27.739	-	-
-0.68	4.726	-0.627	-4.940	-	-
-0.88	5.958	4.926	38.811	8.122	0.450
-1.08	7.992	14.093	111.043	13.737	0.761
-1.28	9.202	19.546	154.013	16.179	0.896
-1.48	9.806	22.269	175.462	17.268	0.956
-1.68	10.116	23.666	186.471	17.802	0.986
-1.88	10.132	23.738	187.039	17.829	0.988

-2.08	10.128	23.720	186.897	17.822	0.987
-2.28	10.137	23.760	187.217	17.837	0.988
-2.48	10.152	23.828	187.750	17.863	0.989
-2.68	10.113	23.652	186.365	17.797	0.986
-2.88	10.083	23.517	185.299	17.746	0.983
-3.08	10.112	23.648	186.329	17.795	0.986
-3.28	10.146	23.801	187.537	17.853	0.989
-3.48	10.148	23.810	187.608	17.856	0.989
-3.68	10.139	23.769	187.288	17.841	0.988
-3.88	10.180	23.954	188.744	17.910	0.992
-4.08	10.167	23.896	188.282	17.888	0.991
-4.28	10.160	23.864	188.034	17.876	0.990
-4.48	10.161	23.869	188.069	17.878	0.990
-4.68	10.162	23.873	188.105	17.880	0.990
-4.88	10.133	23.742	187.075	17.831	0.988
-5.08	10.091	23.553	185.583	17.759	0.984
-5.28	10.050	23.368	184.127	17.690	0.980
-5.48	9.923	22.796	179.617	17.472	0.968

Tabel data profil kecepatan di belakang silinder bersirip, $s = 18 \text{ mm}$					
y/d	Pembacaan arus OM-DAQPRO	Δh inclined manometer	Tekanan dinamik	u	u/U_{max}
	mA	mm	Pa	m/s	
5.52	9.961	22.967	180.967	17.537	0.974
5.32	10.047	23.355	184.021	17.685	0.982
5.12	10.121	23.688	186.649	17.810	0.989
4.92	10.143	23.788	187.430	17.848	0.992
4.72	10.143	23.788	187.430	17.848	0.992
4.52	10.156	23.846	187.892	17.870	0.993
4.32	10.100	23.594	185.903	17.775	0.987
4.12	10.103	23.607	186.010	17.780	0.988
3.92	10.104	23.612	186.045	17.782	0.988
3.72	10.106	23.621	186.116	17.785	0.988
3.52	10.103	23.607	186.010	17.780	0.988
3.32	10.120	23.684	186.613	17.809	0.989
3.12	10.105	23.616	186.081	17.783	0.988
2.92	10.086	23.531	185.406	17.751	0.986
2.72	10.076	23.486	185.051	17.734	0.985
2.52	10.114	23.657	186.400	17.799	0.989
2.32	10.157	23.851	187.927	17.871	0.993
2.12	10.188	23.990	189.028	17.924	0.996
1.92	10.144	23.792	187.466	17.849	0.992

1.72	9.697	21.777	171.592	17.077	0.949
1.52	8.967	18.487	145.668	15.734	0.874
1.32	7.614	12.389	97.620	12.880	0.716
1.12	6.847	8.932	70.382	10.937	0.608
0.92	5.328	2.086	16.439	5.286	0.294
0.72	4.620	-1.105	-8.704	-	-
0.52	4.228	-2.871	-22.625	-	-
0.32	4.179	-3.092	-24.365	-	-
0.12	4.153	-3.209	-25.288	-	-
-0.08	4.165	-3.155	-24.862	-	-
-0.28	4.151	-3.218	-25.359	-	-
-0.48	4.187	-3.056	-24.081	-	-
-0.68	4.313	-2.488	-19.606	-	-
-0.88	4.811	-0.244	-1.921	-	-
-1.08	5.712	3.817	30.075	7.149	0.397
-1.28	6.963	9.455	74.501	11.252	0.625
-1.48	8.379	15.837	124.787	14.563	0.809
-1.68	9.544	21.088	166.158	16.804	0.934
-1.88	9.981	23.057	181.677	17.572	0.976
-2.08	10.044	23.341	183.914	17.679	0.982
-2.28	10.060	23.413	184.483	17.707	0.984
-2.48	10.044	23.341	183.914	17.679	0.982
-2.68	10.021	23.238	183.098	17.640	0.980
-2.88	10.038	23.314	183.701	17.669	0.982
-3.08	10.058	23.404	184.412	17.703	0.984
-3.28	10.066	23.440	184.696	17.717	0.984
-3.48	10.098	23.585	185.832	17.771	0.987
-3.68	10.093	23.562	185.654	17.763	0.987
-3.88	10.111	23.643	186.294	17.793	0.989
-4.08	10.119	23.679	186.578	17.807	0.989
-4.28	10.108	23.630	186.187	17.788	0.988
-4.48	10.134	23.747	187.111	17.832	0.991
-4.68	10.114	23.657	186.400	17.799	0.989
-4.88	10.101	23.598	185.939	17.776	0.988
-5.08	10.021	23.238	183.098	17.640	0.980
-5.28	9.947	22.904	180.470	17.513	0.973
-5.48	9.867	22.544	177.629	17.375	0.965

2. Data Profil Kecepatan dari Hasil Simulasi Numerik



Gambar titik pengambilan data profil kecepatan dan intensitas turbulensi di belakang silinder sirkular dan silinder bersirip

Tabel data profil kecepatan dari hasil simulasi numerik								
y/d	Silinder							
	Tanpa fin		$s = 10 \text{ mm}$		$s = 14 \text{ mm}$		$s = 18 \text{ mm}$	
	$u \text{ (m/s)}$	u/U_{max}	$u \text{ (m/s)}$	u/U_{max}	$u \text{ (m/s)}$	u/U_{max}	$u \text{ (m/s)}$	u/U_{max}
5.60	16.335	0.961	16.610	0.955	16.529	0.956	16.494	0.957
5.52	16.424	0.966	16.698	0.960	16.617	0.962	16.582	0.962
5.40	16.557	0.974	16.829	0.967	16.749	0.969	16.714	0.969
5.32	16.645	0.979	16.917	0.972	16.837	0.974	16.802	0.975
5.20	16.779	0.987	17.048	0.980	16.968	0.982	16.934	0.982
5.12	16.785	0.987	17.057	0.980	16.976	0.982	16.942	0.983
5.00	16.796	0.988	17.069	0.981	16.987	0.983	16.953	0.983
4.92	16.802	0.988	17.077	0.981	16.995	0.983	16.960	0.984
4.80	16.812	0.989	17.089	0.982	17.006	0.984	16.972	0.984
4.72	16.815	0.989	17.093	0.982	17.011	0.984	16.975	0.985
4.60	16.820	0.989	17.100	0.983	17.017	0.985	16.981	0.985
4.52	16.823	0.989	17.105	0.983	17.021	0.985	16.985	0.985
4.40	16.827	0.990	17.112	0.983	17.027	0.985	16.991	0.986
4.32	16.832	0.990	17.120	0.984	17.034	0.986	16.998	0.986
4.20	16.840	0.990	17.132	0.985	17.044	0.986	17.008	0.987
4.12	16.845	0.991	17.140	0.985	17.051	0.987	17.014	0.987

4.00	16.852	0.991	17.152	0.986	17.062	0.987	17.024	0.987
3.92	16.857	0.991	17.161	0.986	17.070	0.988	17.032	0.988
3.80	16.865	0.992	17.175	0.987	17.082	0.988	17.043	0.989
3.72	16.870	0.992	17.185	0.988	17.091	0.989	17.051	0.989
3.60	16.878	0.993	17.199	0.988	17.103	0.990	17.062	0.990
3.52	16.883	0.993	17.208	0.989	17.111	0.990	17.070	0.990
3.40	16.891	0.993	17.222	0.990	17.123	0.991	17.081	0.991
3.32	16.897	0.994	17.233	0.990	17.133	0.991	17.090	0.991
3.20	16.906	0.994	17.250	0.991	17.147	0.992	17.104	0.992
3.12	16.913	0.995	17.261	0.992	17.157	0.993	17.113	0.993
3.00	16.922	0.995	17.279	0.993	17.172	0.994	17.127	0.993
2.92	16.929	0.996	17.291	0.994	17.182	0.994	17.137	0.994
2.80	16.940	0.996	17.309	0.995	17.198	0.995	17.151	0.995
2.72	16.946	0.997	17.322	0.995	17.208	0.996	17.161	0.995
2.60	16.955	0.997	17.343	0.997	17.224	0.997	17.175	0.996
2.52	16.960	0.998	17.357	0.997	17.235	0.997	17.185	0.997
2.40	16.970	0.998	17.375	0.998	17.252	0.998	17.202	0.998
2.32	16.977	0.998	17.386	0.999	17.264	0.999	17.216	0.999
2.20	16.987	0.999	17.402	1.000	17.282	1.000	17.236	1.000
2.12	16.993	0.999	17.392	0.999	17.282	1.000	17.240	1.000
2.00	16.999	1.000	17.337	0.996	17.256	0.999	17.227	0.999
1.92	17.003	1.000	17.301	0.994	17.239	0.998	17.219	0.999
1.80	16.983	0.999	17.074	0.981	17.100	0.989	17.115	0.993
1.72	16.943	0.996	16.739	0.962	16.885	0.977	16.950	0.983
1.60	16.882	0.993	16.237	0.933	16.564	0.958	16.702	0.969
1.52	16.779	0.987	15.662	0.900	16.159	0.935	16.374	0.950
1.40	16.311	0.959	13.601	0.782	14.604	0.845	15.071	0.874
1.32	15.999	0.941	12.227	0.703	13.567	0.785	14.201	0.824
1.20	15.217	0.895	10.018	0.576	11.689	0.676	12.522	0.726
1.12	14.089	0.829	8.260	0.475	9.815	0.568	10.676	0.619
1.00	12.397	0.729	5.624	0.323	7.002	0.405	7.908	0.459
0.92	11.248	0.662	3.915	0.225	5.164	0.299	6.090	0.353
0.80	8.722	0.513	3.188	0.183	3.789	0.219	4.422	0.257
0.72	7.038	0.414	2.704	0.155	2.873	0.166	3.310	0.192
0.60	4.655	0.274	2.088	0.120	1.682	0.097	1.857	0.108
0.52	3.714	0.218	2.181	0.125	1.723	0.100	1.859	0.108
0.40	2.303	0.135	2.322	0.133	1.785	0.103	1.862	0.108
0.32	1.362	0.080	2.415	0.139	1.826	0.106	1.865	0.108
0.20	1.002	0.059	2.144	0.123	1.581	0.092	1.693	0.098
0.12	0.843	0.050	1.931	0.111	1.395	0.081	1.565	0.091
0.00	0.603	0.035	1.612	0.093	1.115	0.064	1.373	0.080
-0.08	0.843	0.050	1.931	0.111	1.395	0.081	1.565	0.091

-0.20	1.002	0.059	2.144	0.123	1.581	0.092	1.693	0.098
-0.28	1.362	0.080	2.415	0.139	1.826	0.106	1.865	0.108
-0.40	2.303	0.135	2.322	0.133	1.785	0.103	1.862	0.108
-0.48	3.714	0.218	2.181	0.125	1.723	0.100	1.859	0.108
-0.60	4.655	0.274	2.088	0.120	1.682	0.097	1.857	0.108
-0.68	7.038	0.414	2.704	0.155	2.873	0.166	3.310	0.192
-0.80	8.722	0.513	3.188	0.183	3.789	0.219	4.422	0.257
-0.88	11.248	0.662	3.915	0.225	5.164	0.299	6.090	0.353
-1.00	12.397	0.729	5.624	0.323	7.002	0.405	7.908	0.459
-1.08	14.089	0.829	8.260	0.475	9.815	0.568	10.676	0.619
-1.20	15.217	0.895	10.018	0.576	11.689	0.676	12.522	0.726
-1.28	15.999	0.941	12.227	0.703	13.567	0.785	14.201	0.824
-1.40	16.311	0.959	13.601	0.782	14.604	0.845	15.071	0.874
-1.48	16.779	0.987	15.662	0.900	16.159	0.935	16.374	0.950
-1.60	16.882	0.993	16.237	0.933	16.564	0.958	16.702	0.969
-1.68	16.943	0.996	16.739	0.962	16.885	0.977	16.950	0.983
-1.80	16.983	0.999	17.074	0.981	17.100	0.989	17.115	0.993
-1.88	17.003	1.000	17.301	0.994	17.239	0.998	17.219	0.999
-2.00	16.999	1.000	17.337	0.996	17.256	0.999	17.227	0.999
-2.08	16.993	0.999	17.392	0.999	17.282	1.000	17.240	1.000
-2.20	16.987	0.999	17.402	1.000	17.282	1.000	17.236	1.000
-2.28	16.977	0.998	17.386	0.999	17.264	0.999	17.216	0.999
-2.40	16.970	0.998	17.375	0.998	17.252	0.998	17.202	0.998
-2.48	16.960	0.998	17.357	0.997	17.235	0.997	17.185	0.997
-2.60	16.955	0.997	17.343	0.997	17.224	0.997	17.175	0.996
-2.68	16.946	0.997	17.322	0.995	17.208	0.996	17.161	0.995
-2.80	16.940	0.996	17.309	0.995	17.198	0.995	17.151	0.995
-2.88	16.929	0.996	17.291	0.994	17.182	0.994	17.137	0.994
-3.00	16.922	0.995	17.279	0.993	17.172	0.994	17.127	0.993
-3.08	16.913	0.995	17.261	0.992	17.157	0.993	17.113	0.993
-3.20	16.906	0.994	17.250	0.991	17.147	0.992	17.104	0.992
-3.28	16.897	0.994	17.233	0.990	17.133	0.991	17.090	0.991
-3.40	16.891	0.993	17.222	0.990	17.123	0.991	17.081	0.991
-3.48	16.883	0.993	17.208	0.989	17.111	0.990	17.070	0.990
-3.60	16.878	0.993	17.199	0.988	17.103	0.990	17.062	0.990
-3.68	16.870	0.992	17.185	0.988	17.091	0.989	17.051	0.989
-3.80	16.865	0.992	17.175	0.987	17.082	0.988	17.043	0.989
-3.88	16.857	0.991	17.161	0.986	17.070	0.988	17.032	0.988
-4.00	16.852	0.991	17.152	0.986	17.062	0.987	17.024	0.987
-4.08	16.845	0.991	17.140	0.985	17.051	0.987	17.014	0.987
-4.20	16.840	0.990	17.132	0.985	17.044	0.986	17.008	0.987
-4.28	16.832	0.990	17.120	0.984	17.034	0.986	16.998	0.986

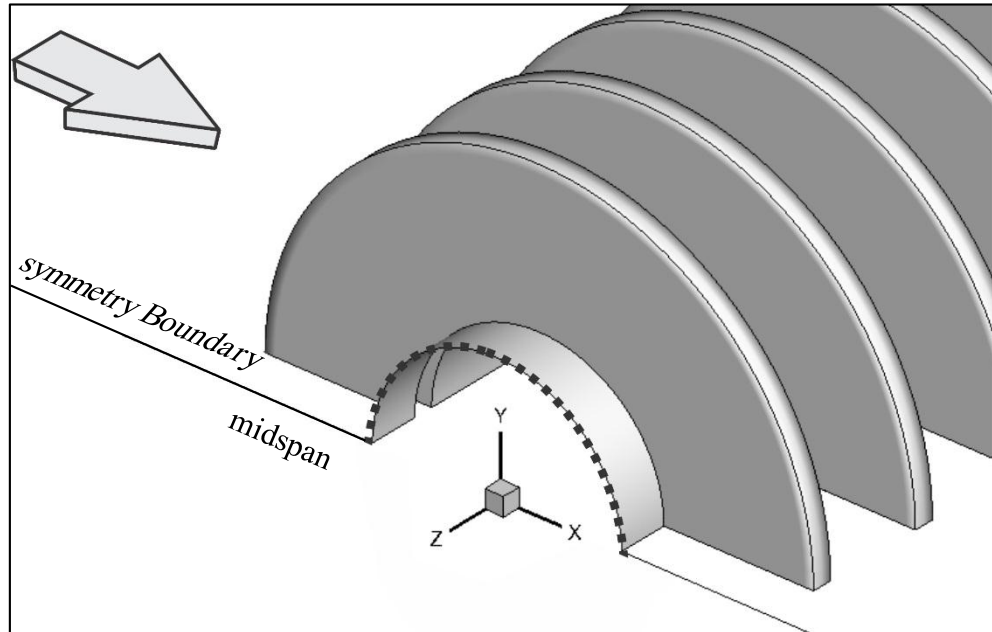
-4.40	16.827	0.990	17.112	0.983	17.027	0.985	16.991	0.986
-4.48	16.823	0.989	17.105	0.983	17.021	0.985	16.985	0.985
-4.60	16.820	0.989	17.100	0.983	17.017	0.985	16.981	0.985
-4.68	16.815	0.989	17.093	0.982	17.011	0.984	16.975	0.985
-4.80	16.812	0.989	17.089	0.982	17.006	0.984	16.972	0.984
-4.88	16.802	0.988	17.077	0.981	16.995	0.983	16.960	0.984
-5.00	16.796	0.988	17.069	0.981	16.987	0.983	16.953	0.983
-5.08	16.785	0.987	17.057	0.980	16.976	0.982	16.942	0.983
-5.20	16.779	0.987	17.048	0.980	16.968	0.982	16.934	0.982
-5.28	16.645	0.979	16.917	0.972	16.837	0.974	16.802	0.975
-5.40	16.557	0.974	16.829	0.967	16.749	0.969	16.714	0.969
-5.48	16.424	0.966	16.698	0.960	16.617	0.962	16.582	0.962
-5.60	16.335	0.961	16.610	0.955	16.529	0.956	16.494	0.957

3. Data Intensitas Turbulensi dari Hasil Simulasi Numerik

Tabel data intensitas turbulensi dari hasil simulasi numerik				
y/d	Silinder			
	Tanpa fin	$s = 10 \text{ mm}$	$s = 14 \text{ mm}$	$s = 18 \text{ mm}$
	$IT \text{ (%)}$	$IT \text{ (%)}$	$IT \text{ (%)}$	$IT \text{ (%)}$
3.00	1.813	2.084	2.028	1.987
2.92	1.844	2.143	2.083	2.037
2.80	1.889	2.232	2.164	2.113
2.72	1.930	2.308	2.236	2.182
2.60	2.002	2.440	2.361	2.302
2.52	2.050	2.528	2.444	2.381
2.40	2.144	2.681	2.593	2.528
2.32	2.220	2.798	2.707	2.642
2.20	2.335	2.973	2.878	2.813
2.12	2.432	3.142	3.030	2.961
2.00	2.623	3.502	3.336	3.255
1.92	2.750	3.742	4.149	3.450
1.80	3.055	4.477	3.540	4.007
1.72	3.379	5.367	4.878	4.658
1.60	3.866	6.702	5.973	5.636
1.52	4.354	7.770	6.928	6.522
1.40	5.907	10.265	9.487	9.023
1.32	6.942	11.929	11.193	10.691
1.20	8.790	13.961	13.453	13.019
1.12	10.592	14.423	14.381	14.237
1.00	13.294	15.115	15.773	16.063
0.92	15.055	15.538	16.648	17.220

0.80	16.166	14.727	15.973	16.666
0.72	16.907	14.186	15.524	16.297
0.60	17.760	13.523	14.928	15.759
0.52	17.159	13.755	14.888	15.476
0.40	16.257	14.103	14.829	15.051
0.32	15.656	14.335	14.789	14.768
0.20	15.113	14.764	15.089	14.941
0.12	14.779	15.056	15.316	15.101
0.00	14.277	15.493	15.656	15.342
-0.08	14.779	15.056	15.316	15.101
-0.20	15.113	14.764	15.089	14.941
-0.28	15.656	14.335	14.789	14.768
-0.40	16.257	14.103	14.829	15.051
-0.48	17.159	13.755	14.888	15.476
-0.60	17.760	13.523	14.928	15.759
-0.68	16.907	14.186	15.524	16.297
-0.80	16.166	14.727	15.973	16.666
-0.88	15.055	15.538	16.648	17.220
-1.00	13.294	15.115	15.773	16.063
-1.08	10.592	14.423	14.381	14.237
-1.20	8.790	13.961	13.453	13.019
-1.28	6.942	11.929	11.193	10.691
-1.40	5.907	10.265	9.487	9.023
-1.48	4.354	7.770	6.928	6.522
-1.60	3.866	6.702	5.973	5.636
-1.68	3.379	5.367	4.878	4.658
-1.80	3.055	4.477	3.540	4.007
-1.88	2.750	3.742	4.149	3.450
-2.00	2.623	3.502	3.336	3.255
-2.08	2.432	3.142	3.030	2.961
-2.20	2.335	2.973	2.878	2.813
-2.28	2.220	2.798	2.707	2.642
-2.40	2.144	2.681	2.593	2.528
-2.48	2.050	2.528	2.444	2.381
-2.60	2.002	2.440	2.361	2.302
-2.68	1.930	2.308	2.236	2.182
-2.80	1.889	2.232	2.164	2.113
-2.88	1.844	2.143	2.083	2.037
-3.00	1.813	2.084	2.028	1.987

4. Data Distribusi Koefisien Tekanan (C_p) di Permukaan Silinder dari Hasil Simulasi Numerik



Gambar titik pengambilan data C_p di permukaan silinder

Tabel distribusi C_p di permukaan silinder dari hasil simulasi numerik				
sudut	Silinder			
	Tanpa fin	$s = 10 \text{ mm}$	$s = 14 \text{ mm}$	$s = 18 \text{ mm}$
0	1.046	1.026	1.036	1.043
5	1.032	1.006	1.018	1.027
10	0.966	0.936	0.949	0.959
15	0.850	0.816	0.831	0.841
20	0.694	0.657	0.672	0.683
25	0.501	0.461	0.478	0.488
30	0.282	0.239	0.257	0.268
35	0.046	0.002	0.021	0.031
40	-0.200	-0.244	-0.223	-0.214
45	-0.442	-0.484	-0.463	-0.455
50	-0.670	-0.706	-0.686	-0.679
55	-0.878	-0.904	-0.885	-0.880
60	-1.046	-1.057	-1.041	-1.038
65	-1.170	-1.161	-1.149	-1.150
70	-1.239	-1.205	-1.200	-1.205
75	-1.245	-1.205	-1.200	-1.206
76	-1.241	-1.205	-1.201	-1.209

77	-1.230	-1.202	-1.200	-1.208
78	-1.217	-1.191	-1.191	-1.200
79	-1.204	-1.181	-1.182	-1.193
80	-1.187	-1.088	-1.098	-1.115
85	-1.057	-0.926	-0.945	-0.968
90	-0.886	-0.739	-0.764	-0.789
95	-0.703	-0.565	-0.588	-0.612
100	-0.541	-0.432	-0.449	-0.467
105	-0.435	-0.364	-0.371	-0.382
106	-	-0.356	-0.362	-0.372
107	-	-0.348	-0.352	-0.361
108	-	-0.343	-0.346	-0.353
109	-0.387	-0.339	-0.340	-0.347
110	-0.378	-0.334	-0.335	-0.341
111	-0.371	-0.330	-0.330	-0.336
112	-0.366	-0.324	-0.327	-0.332
113	-0.361	-0.322	-0.324	-0.329
114	-0.356	-0.323	-0.321	-0.325
115	-0.353	-0.321	-0.319	-0.323
116	-0.351	-0.319	-0.317	-0.321
117	-0.348	-0.318	-0.316	-0.319
118	-0.346	-0.317	-0.314	-0.318
119	-0.344	-0.316	-0.313	-0.317
120	-0.342	-0.316	-0.312	-0.315
125	-0.337	-0.313	-0.309	-0.312
130	-0.336	-0.312	-0.308	-0.310
135	-0.337	-0.311	-0.307	-0.308
140	-0.337	-0.310	-0.306	-0.307
145	-0.335	-0.309	-0.304	-0.306
150	-0.329	-0.307	-0.302	-0.304
155	-0.319	-0.306	-0.300	-0.301
160	-0.307	-0.304	-0.297	-0.298
165	-0.294	-0.302	-0.295	-0.294
170	-0.284	-0.300	-0.292	-0.291
175	-0.278	-0.299	-0.291	-0.290
180	-0.279	-0.299	-0.291	-0.290

5. Data Distribusi Koefisien Tekanan (C_p) di Permukaan Fin dari Hasil Simulasi Numerik

<i>Fin pitch</i>	<i>Pr</i>	Sudut	C_p	Sudut	C_p	Sudut	C_p	Sudut	C_p	Sudut	C_p	Sudut	C_p	Sudut	C_p
10 mm	0.10	0	0.823	30	0.236	60	-0.721	90	-0.577	120	-0.313	150	-0.307	180	-0.302
	0.20		0.751		0.266		-0.537		-0.525		-0.310		-0.307		-0.303
	0.35		0.722		0.327		-0.338		-0.460		-0.311		-0.307		-0.305
	0.50		0.633		0.316		-0.235		-0.406		-0.324		-0.308		-0.307
	0.60		0.570		0.295		-0.194		-0.380		-0.334		-0.308		-0.308
	0.75		0.481		0.254		-0.156		-0.356		-0.352		-0.309		-0.311
	0.90		0.290		0.139		-0.146		-0.347		-0.376		-0.313		-0.313
14 mm	0.10	0	0.842	30	0.262	60	-0.693	90	-0.575	120	-0.308	150	-0.302	180	-0.296
	0.20		0.752		0.278		-0.515		-0.515		-0.304		-0.302		-0.297
	0.35		0.733		0.344		-0.319		-0.449		-0.304		-0.302		-0.299
	0.50		0.653		0.338		-0.211		-0.391		-0.314		-0.303		-0.302
	0.60		0.590		0.318		-0.169		-0.362		-0.323		-0.304		-0.304
	0.75		0.496		0.273		-0.131		-0.334		-0.340		-0.305		-0.306
	0.90		0.297		0.151		-0.123		-0.324		-0.366		-0.310		-0.308
18 mm	0.10	0	0.850	30	0.273	60	-0.684	90	-0.581	120	-0.309	150	-0.304	180	-0.296
	0.20		0.756		0.285		-0.508		-0.516		-0.305		-0.303		-0.297
	0.35		0.737		0.350		-0.313		-0.448		-0.304		-0.304		-0.300
	0.50		0.660		0.347		-0.203		-0.388		-0.313		-0.304		-0.303
	0.60		0.598		0.327		-0.161		-0.358		-0.322		-0.305		-0.304
	0.75		0.502		0.281		-0.123		-0.329		-0.339		-0.306		-0.306
	0.90		0.299		0.156		-0.115		-0.319		-0.367		-0.312		-0.307

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BIODATA PENULIS



Sudirman, dilahirkan di Pinrang, 15 Desember 1986 anak ketujuh dari sepuluh bersaudara pasangan H. Duha dan Hj. Bualanna. Penulis menyelesaikan pendidikan di SDN 010 Tarakan, SMPN 2 Tarakan, dan melanjutkan di SMKN 2 Tarakan. Setelah menyelesaikan pendidikan di SMK, penulis melanjutkan pendidikan di Universitas Muhammadiyah Yogyakarta (UMY), Fakultas Teknik Jurusan Teknik Mesin pada tahun 2004. Selama menempuh pendidikan penulis juga aktif mengikuti kegiatan-kegiatan kemahasiswaan. Diantaranya, kegiatan Lembaga Dakwah Kampus (LDK), HMM, dan Sahabat Perpus. Penulis menyelesaikan pendidikan jenjang S1 dengan masa studi delapan semester dengan predikat sangat memuaskan. Tahun 2012, penulis mendapatkan kesempatan menempuh kuliah 2 semester di Fakultas MIPA ITS, Jurusan Fisika melalui program Pra S2 Saintek. Penulis kemudian melanjutkan studi S2 Teknik Mesin di Fakultas Teknik Industri ITS pada tahun 2013 dan selesai menempuh pendidikan selama empat semester. Penulis telah menikah dengan Resky Rauf pada tahun 2010 dan telah diamanahkan dua orang anak, Hafshah dan Ahmad Syakir. Motto hidup, hidup hari ini (dunia) adalah untuk hidup selanjutnya (akhirat).